

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

DÉLIMITATION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS SUR LE BASSIN DE LA
RIVIÈRE NOIRE À L'AIDE DE LA CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE, DE
LA GÉOCHIMIE DE L'EAU ET DE LA MODÉLISATION

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE LA TERRE

PAR

MARIE-CLAUDE PHARAND

AVRIL 2006

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

AVANT-PROPOS

« L'eau est une denrée essentielle dont dépend toute vie sur Terre. Pour la plupart des nations, le développement économique est inextricablement lié à la disponibilité et à la qualité des ressources en eau douce. Nous utilisons l'eau quotidiennement, considérant cette denrée vitale comme un acquis, notamment dans les régions où elle est naturellement abondante. » (Diop et Rekacewicz, 2003)

La conscientisation de la population à l'égard de la vulnérabilité de la qualité de l'eau, et particulièrement de l'eau souterraine, est nécessaire pour encourager la protection des aquifères et l'utilisation de l'eau souterraine à bon escient. L'eau douce est une richesse naturelle abondante au Québec, il faut néanmoins en prendre soin !!!

Le perfectionnement de la science hydrogéologique appliquée à la vulnérabilité des aquifères régionaux peut contribuer à encourager leur protection. Le présent travail de maîtrise se veut une contribution en ce sens.

Ce mémoire a été achevé après des années de travail grâce au soutien continu de fidèles partenaires. En premier lieu, je tiens à présenter mes respects à ma directrice de recherche Mme Marie Larocque, pour son professionnalisme, ses sciences et sa patience à mon égard.

La contribution financière du Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) a grandement facilité la poursuite de mes études supérieures.

Finalement, je tiens à remercier ma famille et ma belle-famille, et tout particulièrement mon conjoint Alexandre Montcalm, qui m'ont été d'un grand réconfort et d'une noble inspiration pour parfaire mes connaissances et niveaux d'études.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	II
TABLE DES MATIÈRES.....	III
TABLE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
RÉSUMÉ.....	IX
ABSTRACT.....	X
INTRODUCTION.....	1
1.1 PROBLÉMATIQUE.....	1
1.2 ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LA CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE.....	3
1.3 OBJECTIF ET PHASES DE RECHERCHE.....	5
CHAPITRE II.....	7
MÉTHODOLOGIE.....	7
2.1 PIÉZOMÉTRIE DE L' AQUIFÈRE.....	7
2.2 CAMPAGNE D'ÉCHANTILLONNAGE D'EAU SOUTERRAINE.....	9
2.3 CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES DU TILL.....	13
2.4 CONTRIBUTION DE L' AQUIFÈRE AUX DÉBITS EN RIVIÈRE.....	15
2.5 RECHARGE DE L' AQUIFÈRE.....	16
2.6 SIMULATION DE L'ÉCOULEMENT SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE NOIRE.....	16
2.7 CONCLUSION.....	17
CHAPITRE III.....	18
GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE.....	18
DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE NOIRE.....	18
3.1 INFORMATIONS GÉNÉRALES.....	18

CHAPITRE IV	44
GÉOCHIMIE DE L'AQUIFÈRE.....	44
4.1 CONNAISSANCES PRÉALABLES SUR LA GÉOCHIMIE DE L'EAU SUR LE BASSIN VERSANT.....	44
4.2 RÉSULTATS DE PH ET DE CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE	45
4.3 RÉSULTATS DES IONS MAJEURS.....	49
4.4 RÉSULTATS DES NITRATES	53
4.5 QUALITÉ GÉNÉRALE DE L'EAU SOUTERRAINE.....	58
4.6 RÉSULTATS DES ISOTOPES STABLES ^{18}O ET ^2H	59
4.7 DISCUSSION	65
4.8 CONCLUSION	66
CHAPITRE V.....	67
MODÉLISATION ET SIMULATION HYDROGÉOLOGIQUE.....	67
5.1 MODÈLE CONCEPTUEL	67
5.1 RÉSULTATS DES SIMULATIONS.....	69
5.1.1 Scénario 1.....	69
5.1.2 Scénario 2.....	72
5.2 DISCUSSION	76
5.3 CONCLUSION	77
CONCLUSION.....	79
ANNEXE 1	82
COUPES PIÉZOMÉTRIQUES.....	82
ANNEXE 2	92
RÉSULTATS GÉOCHIMIQUES	92
ANNEXE 3.....	113
PHOTOS DU BASSIN DE LA RIVIÈRE NOIRE.....	113
BIBLIOGRAPHIE.....	119

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1.1 : SYSTÈME D'ÉCOULEMENT LOCAL, INTERMÉDIAIRE ET RÉGIONAL SELON TOTH (WINTER ET AL, 1998).....	3
FIGURE 2.2 : LOCALISATION DES MESURES DE NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES.....	8
FIGURE 2.3: LOCALISATION ET NATURE DES STATIONS DE PRÉLÈVEMENT D'EAU.....	10
FIGURE 2.4: LOCALISATION DES STATIONS ÉCHANTILLONNÉES.....	11
FIGURE 2.5 : LOCALISATION DES ÉCHANTILLONS DE TILL.....	14
FIGURE 3.6 : LOCALISATION GÉNÉRALE (SOURCE : WWW.ATLAS.GC.CA).....	19
FIGURE 3.7 : TOPOGRAPHIE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE NOIRE.....	20
FIGURE 3.8 : OCCUPATION DU TERRITOIRE (MENV, 1997).....	22
FIGURE 3.9 : CARTE DES DÉPÔTS DE SURFACE SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE NOIRE.....	23
FIGURE 3.10 : CARTE GÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE (MRN – QUÉBEC, 1985).....	26
FIGURE 3.11 : PIÉZOMÉTRIE RÉGIONALE (INTERVALLES DE 10 M) SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE NOIRE ET DIRECTIONS DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS.....	29
FIGURE 3.12 : AGRANDISSEMENT DE LA CARTE PIÉZOMÉTRIQUE (10M) DES DIRECTIONS D'ÉCOULEMENT LOCALES.....	30
FIGURE 3.13 : RELATION ENTRE LES SOUS-BASSINS AQUIFÈRES ET LES SOUS-BASSINS HYDROLOGIQUES.....	32
FIGURE 3.14 :LOCALISATION ET ORIENTATION DES COUPES TRANSVERSALES.....	33
FIGURE 3.15 : COUPE TRANSVERSALE A-A'.....	34
FIGURE 3.16 : COUPE TRANSVERSALE B-B'.....	35
FIGURE 3.17 : DISTRIBUTION SPATIALE DE LA RECHARGE.....	41
FIGURE 4.18 : VALEURS DE pH DE L'EAU RÉPARTIES SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE NOIRE..	47
FIGURE 4.19. : VALEURS DE CONDUCTIVITÉ DE L'EAU SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE NOIRE.	48
FIGURE 4.20 : DIAGRAMME DE PIPER REGROUPANT LES ÉCHANTILLONS SELON LEUR ORIGINE.....	50
FIGURE 4.21 : DIAGRAMME DE PIPER REGROUPANT LES ÉCHANTILLONS SELON LES DÉPÔTS DE SURFACE.....	51
FIGURE 4.22 : RÉPARTITION DES TYPES D'EAU OBSERVÉES SUR LE BASSIN.....	52
FIGURE 4.23 : PUIITS PRÉSENTANT UNE CONCENTRATION EN NITRATES SUPÉRIEURE À 3,0 MG N-NO ₃ /L.....	55

FIGURE 4.23 : PUIITS PRÉSENTANT UNE CONCENTRATION EN NITRATES SUPÉRIEURE À 3,0 MG N-NO ₃ /L	55
FIGURE 4.24 : TENEURS EN NITRATES DE L'EAU SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE NOIRE.	56
FIGURE 4.25 : RELATION ENTRE LA PROFONDEUR ET LA TENEUR EN NITRATES DES ÉCHANTILLONS.....	57
FIGURE 4.26 : TENEUR EN ² H DE L'EAU SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE NOIRE.....	60
FIGURE 4.27 : SIGNATURES ISOTOPIQUES DES PRÉCIPITATIONS À LA STATION D'OTTAWA (1986-2001),.....	61
FIGURE 4.28 : TENEUR EN ¹⁸ O DE L'EAU SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE NOIRE.	62
FIGURE 4.29 : RAPPORTS ISOTOPIQUES DE L'EAU DU BASSIN DE LA RIVIÈRE NOIRE PAR RAPPORT AU SMOW.	63
FIGURE 4.30 : RELATION ENTRE ² H ET LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE DANS L'EAU SOUTERRAINE	64
FIGURE 5.31 : CARTE PIÉZOMÉTRIQUE SIMULÉE – SCÉNARIO 1.	70
FIGURE 5.32 : COMPARAISON DES CHARGES OBSERVÉES SUR LE TERRAIN ET DES CHARGES SIMULÉES AVEC LE SCÉNARIO 1.	71
FIGURE 5.33 : COMPARAISON DES CHARGES OBSERVÉES (DONNÉES DU SIH) ET DES CHARGES SIMULÉES AVEC LE SCÉNARIO 1.	72
FIGURE 5.34 : CARTE PIÉZOMÉTRIQUE SIMULÉE – SCÉNARIO 2.	74
FIGURE 5.35 : COMPARAISON DES CHARGES OBSERVÉES SUR LE TERRAIN ET DES CHARGES SIMULÉES AVEC LE SCÉNARIO 2.	75
FIGURE 5.36 : COMPARAISON DES CHARGES OBSERVÉES (DONNÉES DU SIH) ET DES CHARGES SIMULÉES AVEC LE SCÉNARIO 2.	76
FIGURE A.1.37 : AGRANDISSEMENT SEGMENT 0-10 KM DE LA COUPE A-A'.....	83
FIGURE A.1.38 : AGRANDISSEMENT DU SEGMENT 10-20 KM DE LA COUPE A-A'.	84
FIGURE A.1.39 : AGRANDISSEMENT DU SEGMENT 20-30 KM DE LA COUPE A-A'.	85
FIGURE A.1.40 : AGRANDISSEMENT DU SEGMENT 30-40 KM DE LA COUPE A-A'.	86
FIGURE A.1.41 : AGRANDISSEMENT DU SEGMENT 40-50 KM DE LA COUPE A-A'.	87
FIGURE A.1.42 : AGRANDISSEMENT DU SEGMENT 50-58 KM DE LA COUPE A-A'.	88
FIGURE A.1.43 : AGRANDISSEMENT DU SEGMENT 0-10 KM DE LA COUPE B-B'.....	89
FIGURE A.1.44 : AGRANDISSEMENT DU SEGMENT 10-20 KM DE LA COUPE B-B'.....	90

FIGURE A.1.45 : AGRANDISSEMENT DU SEGMENT 20-30 KM DE LA COUPE B-B'	91
---	----

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1 : PROTOCOLE D'ÉCHANTILLONNAGE	12
TABLEAU 2.2 : MÉTHODES D'ANALYSES	13
TABLEAU 3.3 : ACTIVITÉS HUMAINES DES SOUS-BASSINS DE LA YAMASKA (MENV, 1997). 21	
TABLEAU 3.4 : CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES DES ÉCHANTILLONS DE TILL.	25
TABLEAU 3.5 : ÉCOULEMENT DE DARCY, À LA STATION 030304.	38
TABLEAU 3.6 : COMPARAISON DES DÉBITS DE BASE ESTIMÉS.	38
TABLEAU 3.7 : INTERVALLES DE RECHARGE POSSIBLE.	40
TABLEAU 4.8 : VALEURS DE pH MESURÉES AUX STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE.	46
TABLEAU 4.9 : VALEURS DE CONDUCTIVITÉ MESURÉES AUX STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE	47
TABLEAU 4.10 : VALEURS DE NITRATES MESURÉES AUX STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE. .	54
TABLEAU 4.11 : QUALITÉ GÉNÉRALE DE L'EAU SOUTERRAINE.	58
TABLEAU 4.12 : VALEURS DE ² H MESURÉES AUX STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE.	59
TABLEAU 4.13 : VALEURS DE ¹⁸ O MESURÉES AUX STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE.	61
TABLEAU 5.14 : VALEUR DE RECHARGE UTILISÉE POUR LES SCÉNARIOS.	68
TABLEAU 5.15 : CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES DU ROC AQUIFÈRE CALÉES POUR LE SCÉNARIO.	69
TABLEAU 5.16 : CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES DU ROC CALÉES POUR LE SCÉNARIO 2.	73
TABLEAU A.2.17 : RÉSULTATS PHYSICO-CHIMIQUES DES ÉCHANTILLONS D'EAU.	93
TABLEAU A.2.18 : RÉSULTATS DES CONCENTRATIONS DES ÉCHANTILLONS EN CATIONS MAJEURS	98
TABLEAU A.2.19 : RÉSULTATS DES CONCENTRATIONS DES ÉCHANTILLONS EN ANIONS MAJEURS	103
TABLEAU A.2.20 : RÉSULTATS DES ÉCHANTILLONS EN CARBONE INORGANIQUE DISSOUS .	108

RÉSUMÉ

La rivière Noire est un sous-bassin de la rivière Yamaska. Elle est située dans la zone de transition entre deux formations géologiques principales du Québec, soit les Basses-Terres du Saint-Laurent et les montagnes appalachiennes. Dans ce secteur les dépôts meubles sont discontinus et d'étendue limitée ; le socle rocheux est très fracturé et hétérogène. Cette région rurale fortement exploitée par l'agriculture intensive et l'industrie porcine présente un fort potentiel de contamination d'origine agricole de l'eau souterraine. Un échantillonnage d'eau souterraine effectué sur l'ensemble du bassin a permis de quantifier les paramètres physico-chimiques de l'eau, les principaux ions, incluant les teneurs en nitrates, ainsi que les contenus en ^{18}O et deutérium. Ces données sont des indicateurs utiles pour identifier les types d'eau et pour établir des relations entrée-sortie sur l'aquifère. Ces informations, combinées aux données géologiques et à la carte piézométrique, permettent d'identifier des sous-secteurs dans les directions d'écoulement souterrain. Le modèle Modflow a été utilisé pour simuler les scénarios de géologie et de recharge du bassin et ainsi tester la pertinence des directions d'écoulement identifiées précédemment. Ainsi, la rivière Noire et certains de ses tributaires majeurs ont été identifiés comme étant des drains importants de l'aquifère. L'étude du bassin a montré que la direction régionale de l'écoulement de l'eau souterraine est orientée vers le nord-ouest et est principalement régie par la topographie et les propriétés du roc. L'aquifère est vulnérable puisqu'il est de nature libre. D'ailleurs, 31 % des puits échantillonnés présentent des concentrations en nitrates supérieures à 1,0 mg N-NO₃/l probablement d'origine anthropique. La complémentarité des approches utilisées dans le cadre de ce projet a été concluante en ce qui a trait à la caractérisation des écoulements souterrains sur un bassin régional. La modélisation représente adéquatement les caractéristiques du bassin mises en évidence par la caractérisation hydrogéologique et la géochimie. Une meilleure compréhension de la circulation des eaux souterraines sur le bassin versant de la rivière Noire aidera à délimiter les zones les plus vulnérables du bassin, ce qui permettra de réduire le potentiel de contamination de cet aquifère.

Mots clés : hydrogéologie, géochimie, piézométrie, modélisation, modflow.

ABSTRACT

The Noire River, a subwatershed of the Yamaska River, is located in the transition zone between two major geological formations of the Québec province, on the boundary between the St-Lawrence Lowlands and the Appalachian mountains. In this zone consisting of discontinuous quaternary deposits of limited extent, the bedrock is mostly fractured and heterogeneous. This rural region, intensively exploited by agricultural activities and a strong pork industry confers to the area a high potential for groundwater contamination. A groundwater sampling done on the whole subwatershed allowed the quantification of the physico-chemical properties of the water, major ions, including nitrate contents, as well as ^{18}O and ^2H contents. This data is useful when used to identify water types and establish relations between water entering and exiting the aquifer. This information, combined with the geological background and a piezometric map of the area, allows the identification of sub-zones of distinct groundwater flow. The Modflow model is used to simulate geological scenarios, typical recharge and drainage of those sub-zones thus verifying the relevance of the previously identified ground water flow directions. The Noire River and some of its major affluents were identified as being important discharges zones for the aquifer. This study demonstrates that the regional direction of the groundwater flow is oriented towards the north-west and is principally influenced by the topography and the bedrock properties. The aquifer is vulnerable since it is unconfined. As such, 31% of the sampled wells showed nitrates concentrations exceeding 1,0 mg N- NO_3/l probably of anthropogenic origin. The combination of the different approaches used in this study was conclusive in respect to the groundwater flow characterization on the regional scale. The model represents adequately the watershed properties identified with the hydrogeological characterization and the geochemistry. A better understanding of the groundwater flow directions on the Noire River will help to delimit the highly vulnerables zones and thus contribute in reducing the contamination potential of this aquifer.

INTRODUCTION

« L'eau souterraine représente 90 % des sources d'eau accessibles. D'après les Nations Unies, plus de 1,5 milliard d'êtres humains en dépendent pour s'approvisionner en eau potable. » (Diop et Rekacewicz, 2003). Les aquifères constituent une ressource en eau considérable et vitale. En raison d'une démographie toujours croissante, l'être humain exploite toujours davantage les ressources en eau, et les activités humaines mettent en péril leur qualité et leur accessibilité. La connaissance approfondie et la protection des aquifères deviennent primordiales pour assurer la prospérité des générations futures.

1.1 Problématique

La rivière Noire draine une importante superficie du bassin de la rivière Yamaska. Depuis peu, cette dernière est reconnue comme étant l'affluent du fleuve Saint-Laurent le plus pollué (COGEBY, 2004). Le sous-bassin de la rivière Noire couvre 1579 km², soit plus du tiers du bassin de la Yamaska.

Le bassin de la rivière Noire est une région rurale fortement exploitée par l'agriculture où l'élevage et l'industrie laitière présentent un fort potentiel de contamination de l'eau. En effet, plusieurs municipalités se trouvent dans des *zones d'activités limitées*. C'est-à-dire que ces municipalités ne possèdent pas les superficies nécessaires à l'épandage des déjections animales produites (COGEBY, 2004). Une étude portant sur la vulnérabilité des formations aquifères réalisée à l'échelle régionale révèle qu'environ 77% du territoire du bassin de la rivière Noire est vulnérable à la contamination des eaux souterraines (Delisle et al., 1998).

La vulnérabilité de l'aquifère semble toutefois très variable localement et des cas de contamination de l'eau souterraine ont été observés sur le bassin (Bolduc et al., 2006). Cette variabilité s'expliquerait par la présence de dépôts meubles discontinus, qui limitent l'infiltration dans certains secteurs, ainsi que par l'hétérogénéité de l'aquifère et la

topographie. Sur des petites portions du bassin de la rivière Noire, Bolduc (2004) et Djineng Njomo (2002) ont mis en évidence la présence d'un écoulement souterrain peu profond qui serait induit par la présence de roc fortement fracturé près de la surface ainsi que par la topographie du terrain. Ces facteurs n'ont pas été pris en compte par Paré (1978) lorsqu'il a identifié les directions d'écoulement régionales sur l'ensemble du bassin de la Yamaska. Le rôle de la topographie et des contrastes de conductivité hydraulique dans la répartition des écoulements souterrains régionaux est résumé dans Toth (2005) qui rappelle les premiers travaux entre autres de Schwartz et Domenico (1973) et Freeze et Witherspoon (1967; 1966). La notion de système d'écoulement souterrain est devenue une doctrine généralement admise suite à la convergence des travaux de ces scientifiques. Les deux principales théories, qui ont orienté leurs études communes, sont que la topographie et l'agencement géologique exercent une influence majeure sur les systèmes régionaux d'écoulement d'eau souterraine. Trois types de systèmes d'écoulement souterrain peuvent apparaître dans un bassin : local, intermédiaire et régional (figure 1.1) (Toth, 1963). Le dénivelé engendre les systèmes d'écoulement locaux et influence l'importance de ces systèmes. Selon la théorie d'écoulement souterrain avancé par Toth (1963), un système d'écoulement local prend sa source dans les zones de topographie élevée puis se décharge dans une zone adjacente de topographie inférieure. Les systèmes d'écoulement intermédiaires se caractérisent par la présence d'une ou plusieurs zones de topographie élevée entre eux, tout en n'occupant pas les topographies extrêmes du bassin régional. Finalement, les systèmes d'écoulement régionaux prennent source dans les zones de limites de partage des eaux et se déchargent à l'aval du bassin. À l'échelle régionale du bassin, les zones de recharge et de décharge alternent, ce qui implique que seulement quelques régions contribuent à l'écoulement de base de la rivière principale du bassin (Toth, 1963).

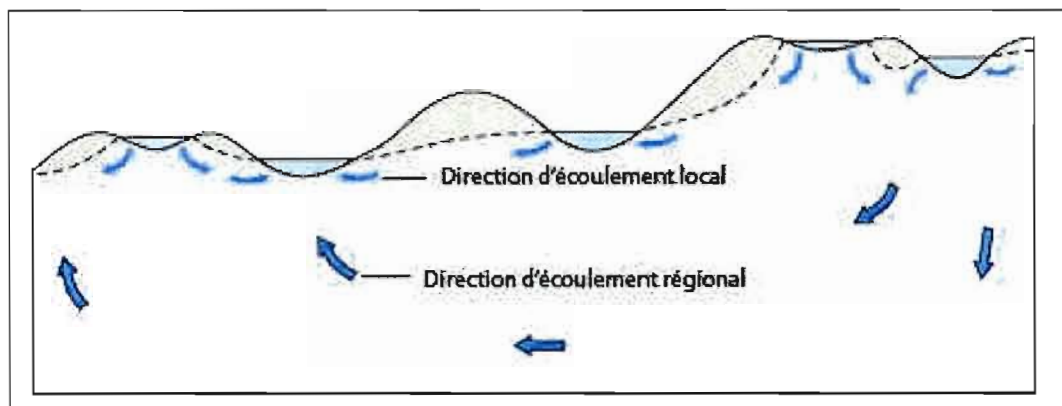


Figure 1.1 : Système d'écoulement local, intermédiaire et régional selon Toth (Winter et al., 1998)

1.2 État des connaissances sur la caractérisation hydrogéologique

Dans la littérature scientifique, on retrouve un grand nombre d'études qui se sont intéressées à la caractérisation hydrogéologique et à l'approfondissement des connaissances sur la circulation hydrogéologique. Ces études utilisent différentes approches selon les caractéristiques du bassin étudié et selon les objectifs visés.

Les recherches sur la circulation de l'eau souterraine emploient fréquemment des traceurs géochimiques, qu'ils soient naturellement présents dans l'eau souterraine (comme ^3H et SF_6 , Zoellmann et al., 2001) ou encore introduits, pour déterminer le temps de résidence de l'eau dans l'aquifère. D'autres données géochimiques, telles que les contenus en ions majeurs et en isotopes stables et radioactifs (Cloutier et al., 2001; Koh et al., 2005), ou encore la température de l'eau (Salem et al., 2004), servent également à caractériser la variation spatio-temporelle de circulation souterraine, et à identifier différents types d'eau souterraine selon la profondeur (Soulsby et al., 1998). La variabilité spatiale et temporelle de la composition isotopique et géochimique est aussi utilisée pour déterminer l'origine de la recharge de l'eau souterraine (Walker et al., 2003; Abd El Samie et Sadeck, 2001). Mais on retrouve aussi, à l'inverse, l'étude de l'écoulement souterrain pour comprendre comment l'eau souterraine acquiert ses caractéristiques géochimiques (Stickel, 1991). La modélisation

géochimique permet quant à elle d'analyser les processus inférant sur la composition chimique de l'aquifère et déterminer ainsi les directions d'écoulement les plus probables (André et al., 2005). Des études utilisent aussi l'évolution spatio-temporelle de la géochimie de l'eau souterraine en relation avec la composition géochimique de l'eau de surface du même bassin pour identifier les relations entre la circulation dans l'aquifère et celle dans les cours d'eau (Ingri et al., 2005; Pehlivan et Yilmaz, 2005), ou pour identifier comment des sources d'eau souterraine influencent l'eau de surface (Subagyo et al., 2005).

Contrairement à l'étude géochimique de l'eau souterraine, la caractérisation des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère sur le terrain, l'étude de la piézométrie et la modélisation hydrogéologique sont rarement utilisées seules, mais plutôt comme des outils dont la mise en commun apporte une caractérisation plus complète des écoulements souterrains. Dans le but de mieux comprendre la dynamique eau de surface – eau souterraine d'un bassin versant, Joerin et al. (2005) ont combiné les traceurs environnementaux, la modélisation hydrogéologique et la géophysique. Pint et al. (2003) ont quant à eux eu recours à la simulation des écoulements souterrains et du transport, de pair avec l'analyse géochimique pour identifier l'alimentation souterraine d'un lac et d'un cours d'eau. Zuber et al. (2005) ont mis en relation la datation isotopique de l'eau souterraine avec des modèles de mélange, d'écoulement et de transport pour la caractérisation d'un aquifère. Bolduc et al. (2006) ont utilisé la caractérisation hydrogéologique sur le terrain et la modélisation hydrogéologique pour identifier la présence d'écoulements souterrains peu profonds et de temps de résidence courts. Au cours des dernières années, la Commission Géologique du Canada (CGC) a travaillé à la caractérisation régionale de nombreux aquifères au Canada, dont plusieurs au Québec (région de Portneuf et de Mirabel, bassin de la rivière Châteauguay) et dans les Maritimes (vallée de l'Annapolis) (Michaud *et al.*, 1997 ; Savard *et al.* 2000 ; Nastev *et al.*, 2004 ; Rivard *et al.*, 2005). Ces travaux ont permis de développer une méthodologie de caractérisation incluant la caractérisation hydraulique sur le terrain (ex. : Lavigne et al., 2005), la caractérisation géochimique (ex. : Blanchette et al., 2005) et la modélisation hydrogéologique (ex. : Benoit et al., 2005). Cette approche combine plusieurs techniques et nécessite beaucoup de financement et d'importantes équipes de recherche.

En résumé, les principales méthodes généralement utilisées pour déterminer les directions d'écoulement de l'eau souterraine à l'intérieur de formation aquifères régionales sont les suivantes (Salem et al, 2004) : la piézométrie, les traceurs géochimiques et les simulations numériques, avec tout ce que ces dernières nécessitent en termes de caractérisation géologique et hydrogéologique (transmissivités, recharge, etc.).

1.3 Objectif et phases de recherche

Le présent travail s'inscrit dans la lignée des caractérisations hydrogéologiques régionales mises en œuvre au cours des dernières années par la CGC. Toutefois, à la différence de ces études où des fonds importants sont investis dans le but d'enrichir une base de données nationale, l'objectif visé par ce projet de maîtrise est de vérifier si les directions d'écoulement (locales et régionales) et les sous-bassins aquifères du bassin de la rivière Noire peuvent être identifiés à l'aide d'une étude intégrée des données existantes et de l'acquisition d'un minimum d'informations complémentaires. Ces directions d'écoulement aideront également à évaluer l'interaction entre l'eau de surface et l'eau souterraine, de même que l'influence de la topographie et de la nature des dépôts meubles sur la piézométrie régionale. Enfin, ces connaissances sur la circulation de l'eau dans l'aquifère de la rivière Noire permettront de délimiter les zones de grande vulnérabilité du bassin et de faciliter la protection de l'eau souterraine de la région.

Dans le cadre de cette étude, trois approches principales sont utilisées. Dans un premier temps, une caractérisation hydrogéologique sommaire est réalisée, notamment par des mesures de conductivités hydrauliques en laboratoire, par l'évaluation de la recharge et par une étude approfondie de la piézométrie régionale et locale. Les caractéristiques géochimiques de l'eau souterraine et de surface sont ensuite analysées à la lumière des résultats d'une campagne d'échantillonnage réalisée en mai 2003. Finalement, la modélisation hydrogéologique régionale sur la zone d'étude permet de tester divers scénarios d'écoulement, sur la base de la caractérisation réalisée par les précédentes méthodes. Le projet est basé sur deux hypothèses : la première est que chacune de ces

méthodes apporte des informations partielles sur les directions d'écoulements souterrains du bassin versant, mais que leur usage combiné constitue une approche plus cohérente pour l'étude des aquifères à l'échelle régionale; la seconde hypothèse est que les directions d'écoulement dans un aquifère régional peuvent être identifiées par le traitement d'un minimum d'informations.

Le mémoire est divisé en cinq parties: le premier chapitre décrit la démarche méthodologique utilisée; le second chapitre présente le bassin de la rivière Noire et les résultats de la caractérisation géologique et hydrogéologique réalisée; le troisième chapitre présente les résultats et interprétations déduites de la réalisation de la carte piézométrique régionale; les résultats de l'investigation géochimique de l'eau du bassin sont présentés au chapitre quatre; les résultats des simulations hydrogéologiques sont ensuite présentés au cinquième chapitre. Finalement, le mémoire se termine par une conclusion générale.

Les résultats partiels de ce travail ont été présentés en 2004 à la conférence de l'ACFAS (Pharand et Larocque, 2004) et à celle de l'AIH (Larocque et Pharand, 2004).

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

La délimitation des écoulements souterrains sur le bassin de la rivière Noire fut réalisée à l'aide de trois approches distinctes : la caractérisation géologique et hydrogéologique de l'aquifère, la géochimie de l'eau souterraine ainsi que la modélisation hydrogéologique. Le présent chapitre traite de l'acquisition des données, de leur traitement ainsi que des principales étapes entreprises pour le développement de ce projet d'étude sur le bassin de la rivière Noire.

2.1 Piézométrie de l'aquifère

Des niveaux piézométriques furent relevés lors de la campagne de terrain réalisée au printemps 2003 pour les puits accessibles et autorisés. Trente-quatre niveaux d'eau des puits furent mesurés à l'aide d'une sonde piézométrique et les puits ont été localisés à l'aide d'un GPS. Le Système d'Informations Hydrogéologiques (SIH) (MDDEP, 2005) a aussi permis d'obtenir 3970 niveaux piézométriques supplémentaires sur l'ensemble du bassin versant de la rivière Noire. L'ensemble de ces charges (figure 2.2) provenant des mesures dans les puits de particuliers et du SIH ont été utilisées pour tracer une carte piézométrique de la zone à l'étude.

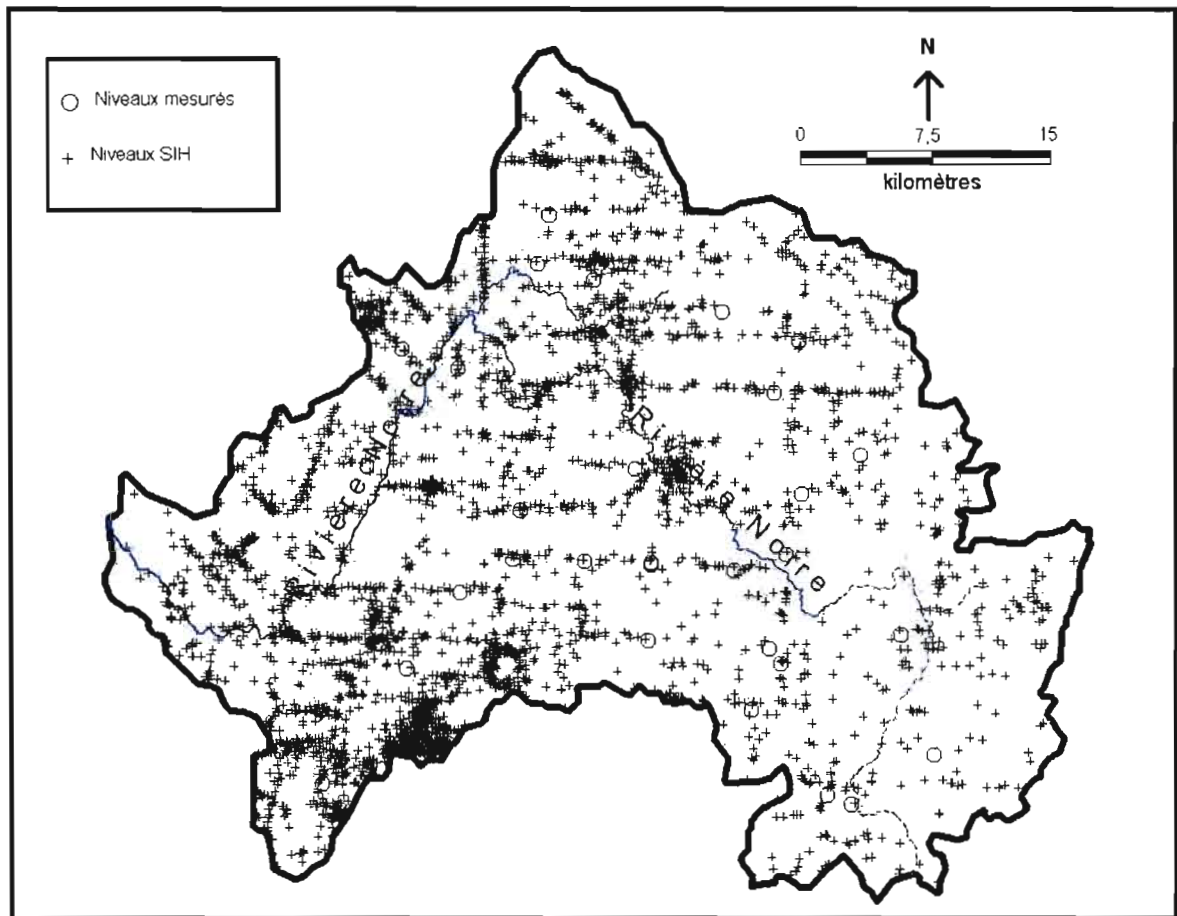


Figure 2.2 : Localisation des mesures de niveaux piézométriques.

L'élévation des forages a été déduite des cartes topographiques de la région. Une première ébauche de la carte piézométrique a été réalisée à l'aide des logiciels MapInfo et Vertical Mapper. Cette carte a ensuite été retravaillée manuellement de manière à mieux refléter la réalité du terrain étudié et à éviter les artifices liés à l'interpolation.

Pour réaliser la carte de piézométrie régionale du bassin de la rivière Noire, certaines hypothèses préalables ont dû être utilisées concernant la délimitation de l'aquifère, ses propriétés ainsi que l'utilisation des données disponibles.

Notons que les informations concernant les puits du territoire à l'étude présentent une variabilité considérable selon les années de saisie, la répartition régionale, le type, la nature

et le diamètre du forage. Pour être en mesure d'utiliser ces données, il a fallu faire abstraction de cette variabilité en admettant que l'aquifère est en régime permanent et que les niveaux piézométriques ne fluctuent pas de manière significative. Aussi, il a été admis que l'erreur cumulée résultant de l'ensemble de ces imprécisions peut totaliser plusieurs mètres (≤ 10 m).

Une dizaine puits présentant une cote piézométrique incohérente par rapport à celle des puits voisins n'ont pas été utilisés pour le tracé des courbes piézométriques. À l'inverse, les secteurs du bassin ne présentant pas ou peu de données de forages ont été complétés en posant le niveau piézométrique à 2,5 m sous la topographie. Une importance particulière a été accordée aux 34 niveaux piézométriques mesurés au printemps 2003 puisque ces données sont actuelles et précisément localisées dans l'espace. L'utilisation de ces données était donc privilégiée dans les secteurs où les données de forage abondaient.

2.2 Campagne d'échantillonnage d'eau souterraine

Une campagne de terrain fut réalisée du 20 mai au 5 juin 2003 afin de recueillir des données géochimiques sur l'eau souterraine et de surface dans le domaine à l'étude. Au total, 83 stations d'échantillonnage d'eau ont été choisies sur le territoire. La répartition des stations sur le bassin versant est illustrée à la figure 2.3. Ces points d'échantillonnage furent localisés à l'aide des cartes géologique, de dépôts de surface et topographique du sous-bassin versant de la rivière Noire, afin de représenter le plus possible la diversité des conditions géologiques rencontrées sur le bassin. L'eau souterraine est prélevée à 72 stations : 14 échantillons proviennent de puits de surface (profondeur $\leq 4,5$ mètres) dont une pointe filtrante; deux autres échantillons ont été puisés dans des sources; 55 échantillons proviennent de puits profonds. Douze stations d'échantillonnage ont été établies dans la rivière Noire ou dans ses affluents. La plupart des puits de surface échantillonnés sont situés dans le secteur amont du bassin, soit au sud-est.

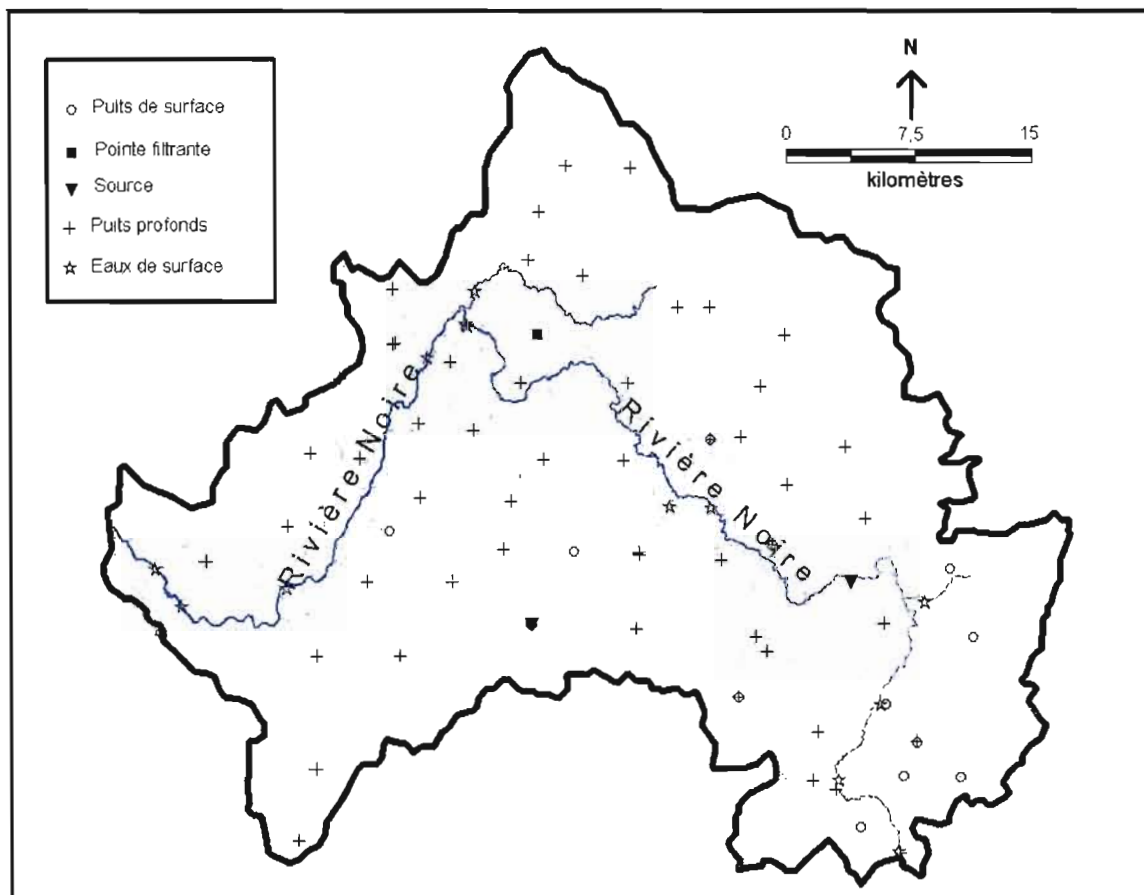


Figure 2.3: Localisation et nature des stations de prélèvement d'eau.

Les échantillons d'eau souterraine ont été prélevés à partir de puits appartenant à des particuliers, directement du robinet, en amont de tout système de traitement. Préalablement à l'échantillonnage, chaque station fut purgée jusqu'à l'obtention d'un équilibre physico-chimique mesuré à l'aide d'une sonde multi-paramètres. Les paramètres de pH, de conductivité électrique et de température ont servi à caractériser cet équilibre. Les stations de mesure ont été classées en stations principales et secondaires. Les stations principales ont fait l'objet d'analyses complètes tandis que seuls quelques paramètres furent mesurés aux stations secondaires. L'eau des 44 stations principales fut analysée pour sa teneur en différents ions (NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{2-} , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} et CO_3^{2-} , Al^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} , Si^{2+} , F^- , Br^-), en carbone inorganique et en isotopes stables ^{18}O et ^2H . L'eau des 23 stations secondaires fut analysée pour sa teneur en nitrates seulement. Des prises de mesures de

paramètres physico-chimiques (pH et conductivité électrique) furent ajoutées à la confluence de certains tributaires avec la rivière Noire. La figure 2.4 présente l'ensemble des stations de mesures et d'échantillonnage réparties sur le sous-bassin versant.

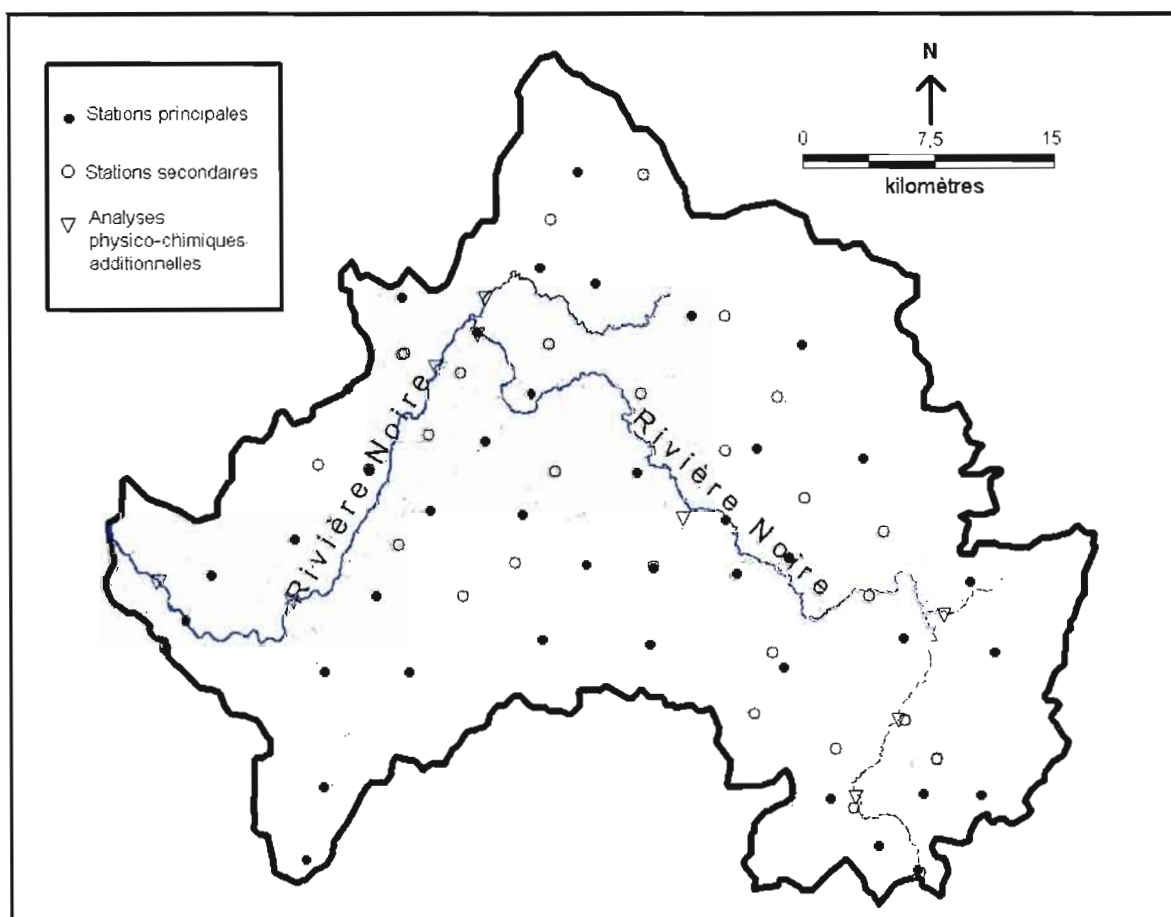


Figure 2.4: Localisation des stations échantillonnées.

Tableau 2.1 : Protocole d'échantillonnage

Paramètre		Type de bouteille	Volume prélevé	Préservation
Ions majeurs	Cations	Plastique HDPE	25 ml	Acide nitrique
	Anions	Plastique HDPE	500 ml	-
Nitrates		Fiole en verre, stérilisée	4 ml	Acide sulfurique
Isotopes stables	^{18}O	Plastique HDPE	25 ml	-
	^2H	Plastique HDPE	25 ml	-
CID		Verre foncé, stérilisée	30 ml	-

La mesure des paramètres physico-chimiques était relevée après stabilisation de la lecture. Subséquemment, le prélèvement des échantillons était réalisé de manière à limiter le brassage de l'eau et l'oxygénation. Ce prélèvement s'effectuait à l'aide d'une seringue de 10 ml doublement rincée avec de l'eau distillée et rincée préalablement avec l'eau à prélever. Les seringues étaient munies de filtres Millipores Duapore de 45 μm et de 25 mm de diamètre. Les récipients étaient finalement fermés hermétiquement sans laisser de bulles d'air dans le flacon puisque la mise en contact avec l'air et la décompression sont responsables de changements au sein de la solution. Chacune des bouteilles de l'échantillon était ensuite identifiée, scellée avec du parafilm afin d'éviter toute contamination externe, puis rapidement déposée à l'intérieur d'une glacière pour préserver l'échantillon à une température d'environ 4°C. Le tableau 2.1 décrit les volumes d'eau prélevés et le type de bouteille utilisée pour analyser les différents paramètres.

L'acidification nécessaire à la préservation de certains des échantillons était réalisée après chaque journée d'échantillonnage. Ainsi, deux gouttes d'acide sulfurique de concentration 2N étaient ajoutées aux bouteilles pour l'analyse en nitrates afin de limiter l'activité microbienne et trois gouttes d'acide nitrique de concentration 16N étaient ajoutées aux bouteilles pour l'analyse des cations.

Les échantillons acidifiés pour analyse de nitrates ont été acheminés au laboratoire dans un délai minimal afin d'y être analysés à l'intérieur de 24 heures, selon la technique d'analyse

utilisée dans la présente étude. Une seconde contrainte de délai d'analyse s'appliquait aux échantillons de carbone inorganique dissous (CID). Ces échantillons devaient être acheminés au laboratoire d'analyse à l'intérieur d'un délai de 48 heures pour analyses. Ainsi, un envoi quotidien par courrier prioritaire amenait les bouteilles pour analyses de CID au laboratoire d'analyse concerné.

Les méthodes d'analyses utilisées varient selon les paramètres analytiques et sont présentées au tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Méthodes d'analyses

Paramètre	Type d'analyse	Laboratoire
pH et conductivité	Sonde multi-paramètres WTW, sondes Sentix 41-3 et TetraCon 325	-
Nitrates	Colorimétrie	GÉOTOP – UQÀM - McGILL
Ions majeurs	Chromatographie ionique	INRS-ETE
Isotopes stables : $^{18}\text{O} - ^2\text{H}$	Spectrométrie de masse	GÉOTOP – UQÀM - McGILL
Carbone inorganique	Analyseur CID	INRS-ETE

2.3 Conductivités hydrauliques du till

Une campagne de terrain fut réalisée les 15-16 juillet 2004 afin de recueillir des échantillons des dépôts de till qui recouvrent l'est du territoire. Cette campagne se concentra dans ce secteur compte tenu des discordances notées entre les descriptions stratigraphiques des rapports de forages provenant du SIH et la carte de dépôts de surface du territoire. Au total, 26 stations ont été visitées. Les arrêts ont permis de valider les données issues de la cartographie du quaternaire. Des dépôts de till ont majoritairement été identifiés et ceux-ci

furent échantillonnés à l'aide d'une pelle à 10 de ces arrêts. Le volume de till prélevé était d'environ $0,001 \text{ m}^3$. La localisation des échantillons de till est présentée à la figure 2.5.

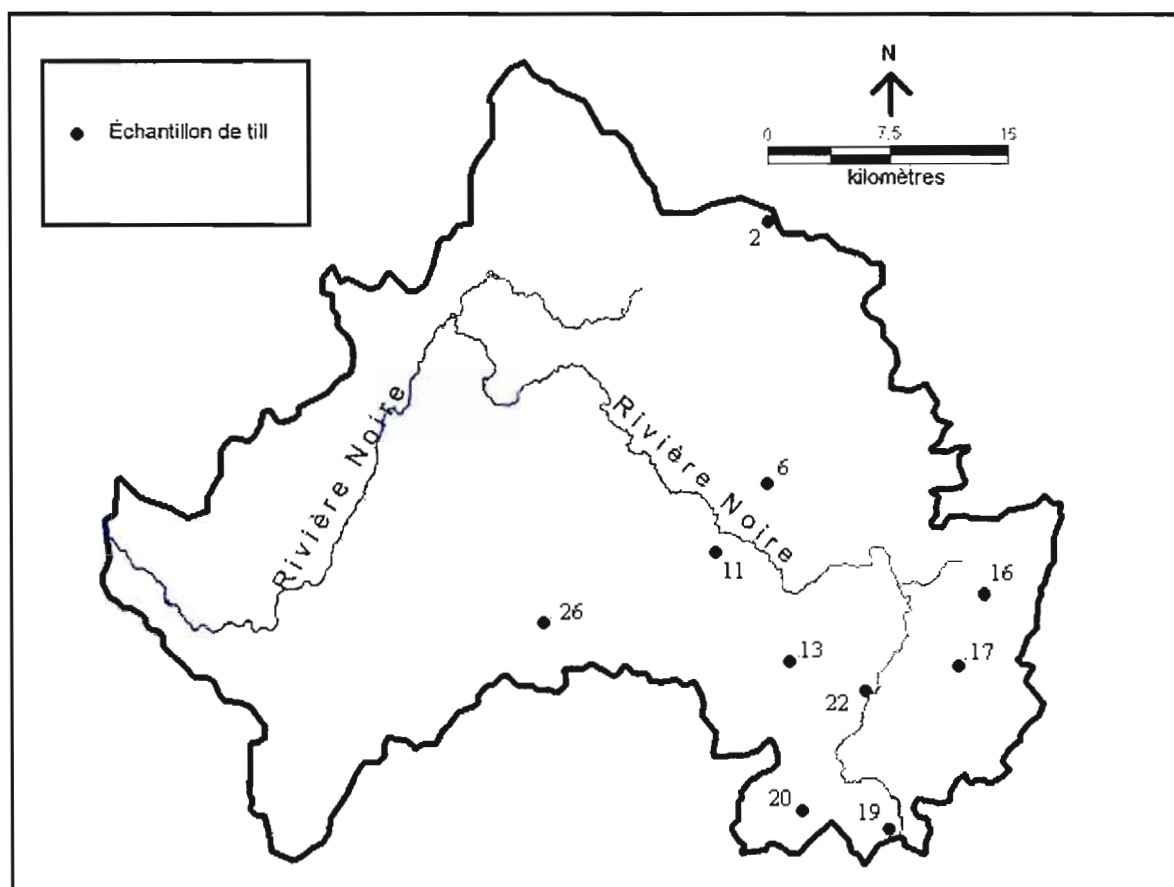


Figure 2.5 : Localisation des échantillons de till.

Les échantillons recueillis ont été soumis à des tests de perméabilité effectués en laboratoire à l'aide d'un perméamètre du type K-605A. Le dispositif à charge hydraulique variable a été utilisé en raison des conductivités relativement faibles du till. Les tests de perméabilité ont été répétés deux fois pour tous les échantillons. La conductivité hydraulique était par la suite calculée selon l'équation 2.1 .

$$K = - ((\ln(h/h_0)) * L * a) / (A * (t - t_0)) \quad \text{Équation 2.1}$$

Où

K = conductivité hydraulique (m/sec)

L = épaisseur d'échantillon utilisé (m)

a = section du tube (m²)

t = temps nécessaire pour recueillir Q (sec)

h = est la distance verticale entre la base de l'entonnoir et la valve exutoire (m)

A = section d'échantillon traversée par l'eau (m²).

2.4 Contribution de l'aquifère aux débits en rivière

Les données piézométriques ont été utilisées pour estimer la contribution de l'aquifère aux débits dans la rivière Noire. Pour cela, l'équation d'écoulement de Darcy a été utilisée (équation 2.2).

$$Q = KSi \quad \text{Équation 2.2}$$

Où

Q = débit échangé entre l'aquifère et la rivière (m³/s)

K = conductivité hydraulique de l'aquifère (m/s)

S = surface d'écoulement du massif filtrant vis-à-vis du tronçon de rivière (m²)

i = gradient hydraulique à proximité de la rivière (m/m)

Des hypothèses simplificatrices ont été utilisées pour l'évaluation de l'échange nappe-rivière. Entre autres, les apports à la rivière ont été établis dans les 500 m en bordure de la rivière Noire. Les conductivités hydrauliques (K) proviennent de Paré (1978) et Bolduc (2004), les gradients hydrauliques moyens (i) ont été estimés sur cette distance à l'aide de la carte piézométrique et la surface d'écoulement du massif filtrant vis-à-vis du tronçon de rivière (S) a été considérée sur une épaisseur constante, soit 10 ou 15 m (Djineng Njomo, 2002).

2.5 Recharge de l'aquifère

La méthode d'évaluation de la recharge est basée sur le bilan hydrique du bassin versant au cours d'un cycle hydrologique (emmagasinement nul) (équation 2.3) et utilise les débits de base journaliers de la rivière Noire estimés à l'aide d'un filtre de Chapman (Chapman, 1991), tel que rapporté par Gauthier (2003).

$$\Sigma \text{ eaux entrées} = \Sigma \text{ eaux sorties} \quad \text{Équation 2.3}$$

$$\text{Recharge (écoulement sout.)} + \text{Ruissellement (surface)} = \text{Débit (exutoire)} \quad \text{Équation 2.4}$$

Si le bassin hydrogéologique correspond au bassin hydrologique, les débits de base devraient refléter entièrement la recharge de l'aquifère. Cette hypothèse relève du fait que l'écoulement à l'exutoire du bassin versant correspond à la sommation de l'eau provenant de l'écoulement souterrain, du ruissellement de surface. En isolant le débit de base à l'aide d'un filtre mathématique (i.e. Chapman), il est possible d'estimer la portion du débit de la rivière qui provient de la nappe phréatique. En supposant que les variations d'emmagasinement de l'aquifère sont négligeables au cours d'un cycle hydrologique, la contribution de la nappe à la rivière équivaut à la recharge annuelle de l'aquifère. Ainsi, le débit de base annuel divisé par la superficie du territoire, égale la recharge annuelle moyenne de la nappe du bassin.

2.6 Simulation de l'écoulement sur le bassin de la rivière Noire

La conception du modèle du bassin de la rivière Noire a été réalisée à l'aide du programme ModFlow (McDonald et Harbaugh, 1988) dans l'interface GMS (Groundwater Modeling System). Le développement du modèle régional du bassin versant de la rivière Noire a été réalisé par l'approche conceptuelle. Le bassin, totalisant 1579 km², a été divisé en 120 cellules longitudinales par 100 cellules latitudinales. La taille des cellules ainsi créées sont de 508,6 par 510,6 m respectivement. Le modèle d'écoulement tridimensionnel a été réalisé en 5 couches de 5, 10, 15, 25 et 40 m d'épaisseur respective. Le régime permanent a été

utilisé pour les simulations. Pour reproduire les conditions naturelles du bassin de la rivière Noire, les hypothèses et simplifications utilisées pour réaliser la carte piézométrique et concernant les limites de l'aquifère, ont également été appliquées à la conception du modèle numérique du bassin.

2.7 Conclusion

Les trois principales méthodes utilisées dans ce mémoire, i.e. la caractérisation géologique et hydrogéologique, la géochimie et la modélisation hydrogéologique furent analysées à la fois distinctement et conjointement pour déterminer les directions d'écoulements régionales et locales sur le bassin de la rivière Noire. Cette démarche est accomplie pour estimer la complémentarité des méthodes utilisées dans la compréhension des directions d'écoulement dans un aquifère régional.

CHAPITRE III

GÉOLOGIE ET HYDROGÉOLOGIE

DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE NOIRE

Dans le but de mieux comprendre les directions d'écoulement sur le bassin à l'étude, celui-ci a d'abord été caractérisé à la fois par des mesures sur le terrain et en laboratoire. Le présent chapitre présente toutes les connaissances actuelles sur le bassin de la rivière Noire, ainsi que les résultats de la caractérisation géologique et hydrogéologique réalisée dans le cadre de cette étude.

3.1 Informations générales

Le bassin de la rivière Noire couvre une superficie totale de 1579 km². Le bassin est couvert par les feuilles SNRC 1:50 000 31H07, 31H08, 31H09 et 31H10 et sa localisation est illustrée à la figure 3.6. Le bassin, situé en Montérégie, n'inclus pas les grandes villes de Saint-Hyacinthe ou Granby, mais couvre une partie des agglomérations urbaines périphériques de ces villes. La ville d'importance du bassin, Acton Vale, est située au centre nord du bassin.

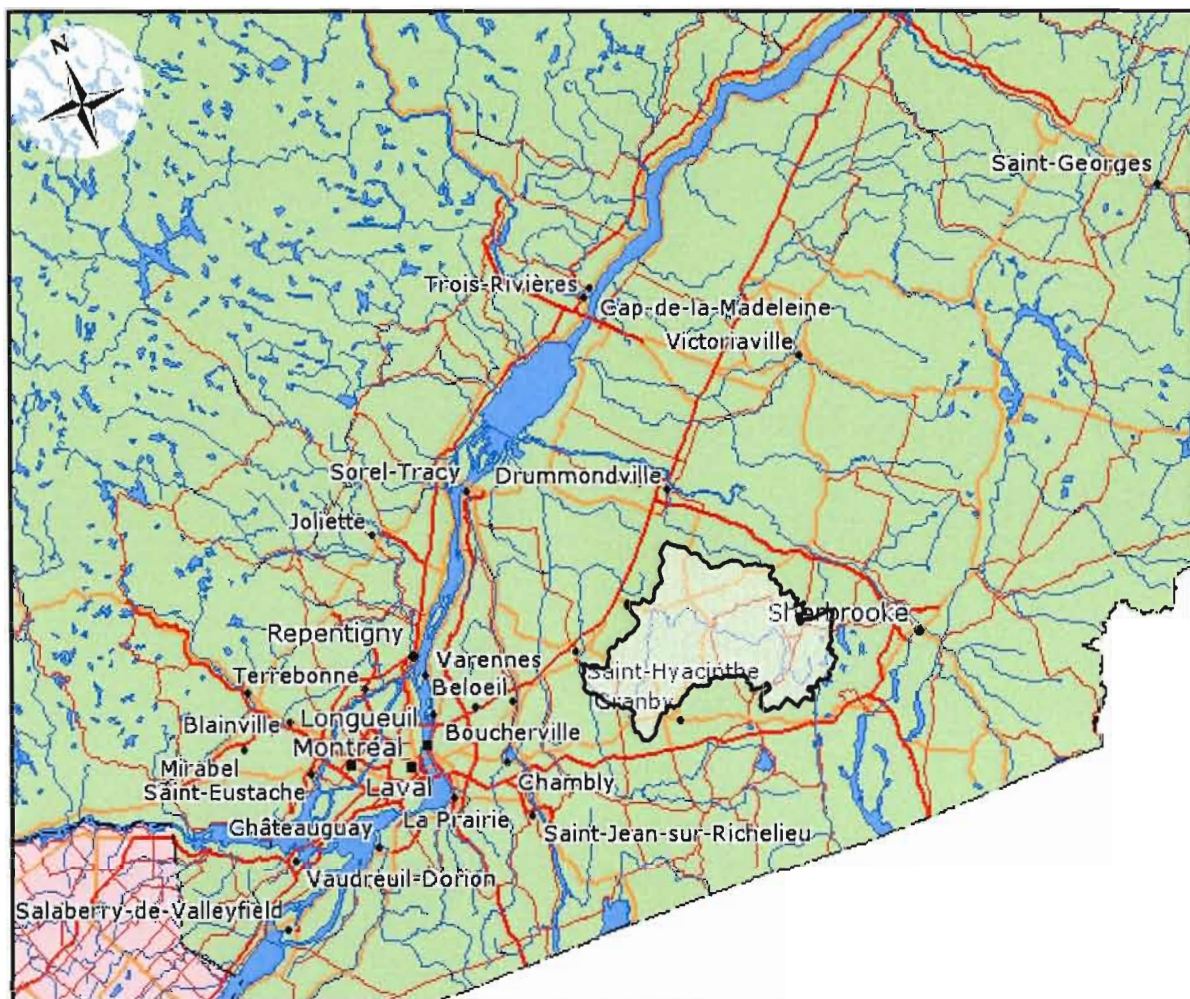


Figure 3.6 : Localisation générale (source : www.atlas.gc.ca)

Le dénivelé topographique du territoire est de 450 m. Les crêtes topographiques se situent à l'est du bassin et atteignent 480 m. Les limites, le réseau hydrographique et la topographie du bassin sont illustrées à la figure 3.7. Les stations de mesures de débit de la rivière Noire (030304 et 030339) sont également localisées sur la figure 3.7. Les données obtenues entre 1982 et 1995, de débit en rivière à ces stations, ont été utilisées pour calculer le débit de base de la rivière Noire par Gauthier (2003).

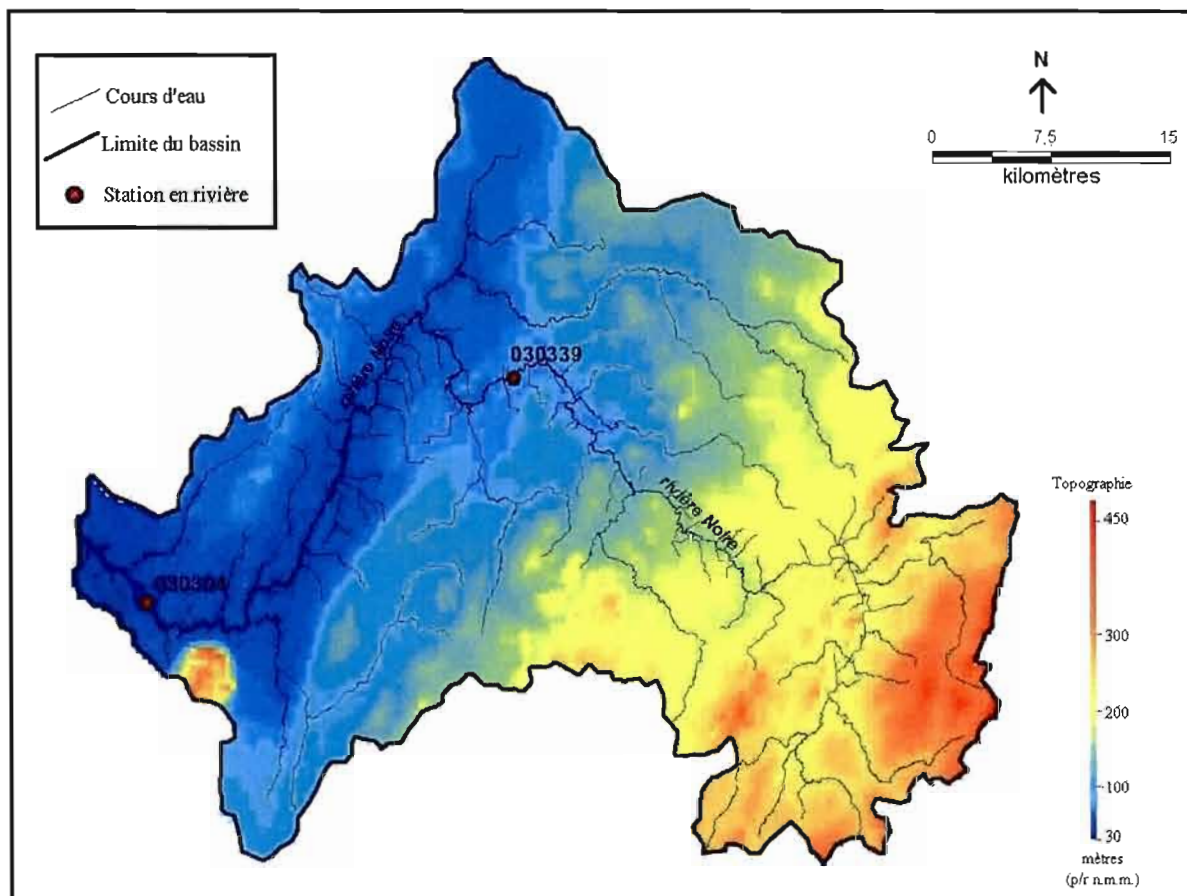


Figure 3.7 : Topographie du bassin versant de la rivière Noire.

Le bassin de la rivière Noire est une région rurale fortement exploitée par l'agriculture, l'élevage et l'industrie laitière. Le tableau 3.3 présente les données relatives à l'occupation humaine du territoire. Selon ces données, le rapport entre le nombre d'unités animales et la superficie du territoire consacrée à la culture est le plus important sur le bassin versant de la rivière Noire. Tel que mentionné précédemment, plusieurs municipalités du bassin de la rivière Noire se trouvent dans des *zones d'activités limitées*; c'est-à-dire que ces municipalités ne possèdent pas les superficies nécessaires à l'épandage des déjections animales produites (COGEBY, 2004).

Tableau 3.3 : Activités humaines des sous-bassins de la Yamaska (MENV, 1997)

Sous-bassin	Superficie (km ²)	Population	Population avec services d'égouts	Nombre d'industrie retenues	Superficie en culture (%)	Cheptal (nombre d'unités animales)
Yamaska	1759	95284	77 847	51	57,7	143 345
Yamaska Sud- est	411	24318	16 319	12	22,5	7029
Yamaska Nord	303	64336	43 897	29	28,2	20 272
Noire	1579	35563	16 430	17	42,7	111 563
Salvail	206	2906	500	0	53,7	12 546
David	326	4321	926	1	59,8	14 569
Pot au Beurre	208	3994	603	0	45,8	6 184

Tel qu'illustré à la figure 3.8, très peu de villes sont présentes sur le bassin mais l'agglomération urbaine de Acton Vale est illustrée en gris, dans la portion nord du centre du bassin. Les parcelles de cultures spécialisées et de maïs sont fortement concentrées à l'ouest du bassin. Les portions centre et est sont majoritairement couvertes de forêts mixtes et de feuillus, de même que de pâturages.

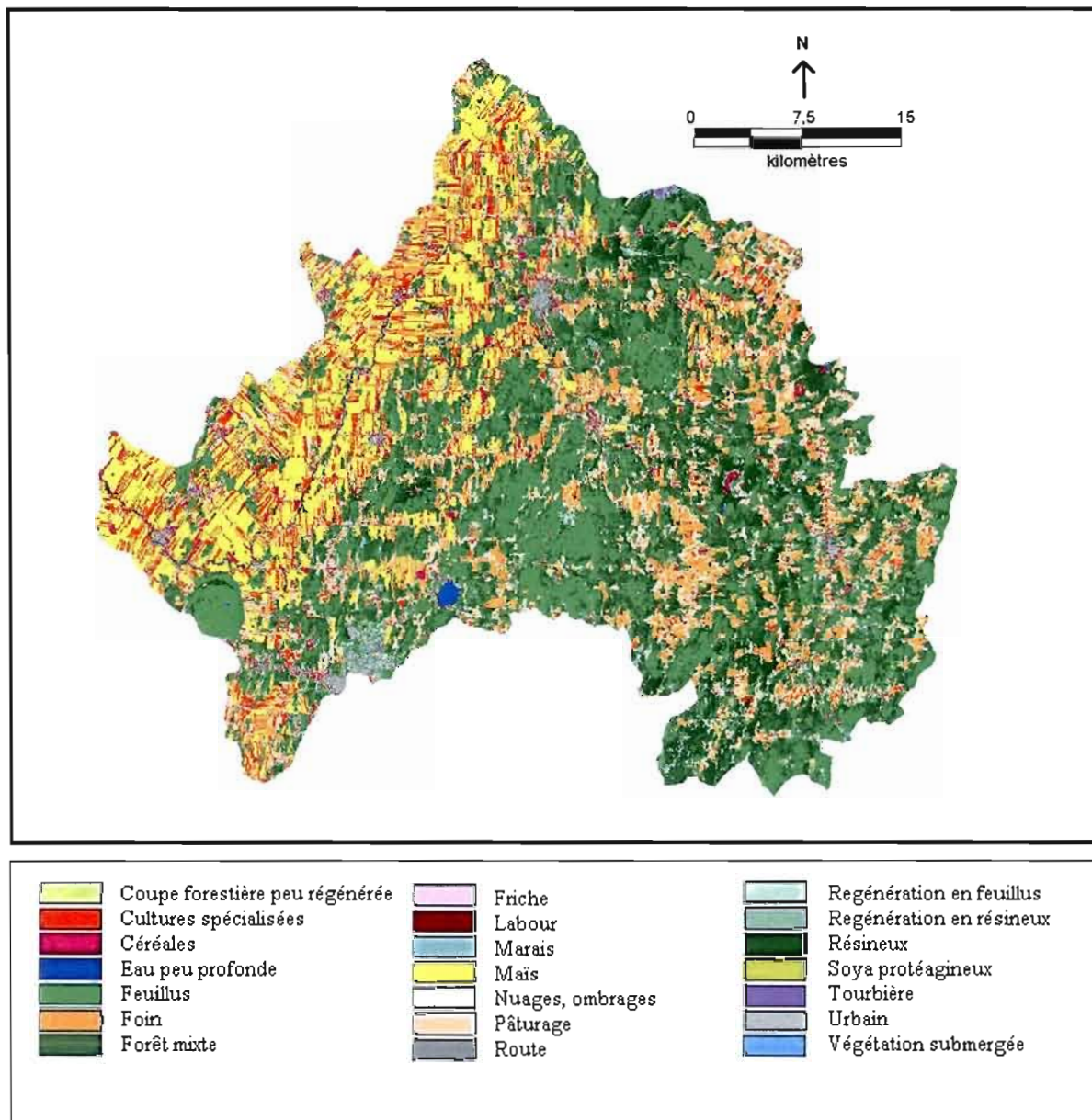


Figure 3.8 : Occupation du territoire (MENV, 1997).

3.2 Dépôts de surface

Le substratum rocheux est recouvert de dépôts meubles provenant de deux origines distinctes, soit des dépôts glaciaires datant de la dernière glaciation, puis des dépôts marins

associés à la Mer de Champlain, épisode temporel de près de 3000 ans suivant le retrait des inlandsis. Ces dépôts meubles sont présents de manière discontinue et se déploient en épaisseurs variables sur le bassin de la rivière Noire. Une carte sommaire des dépôts de surface retrouvés sur le bassin a été réalisée à partir des cartes DV84-10 31H07, 31H08, 31H09 et 31H10 (MER, 1984). Cette carte est présentée à la figure 3.9.

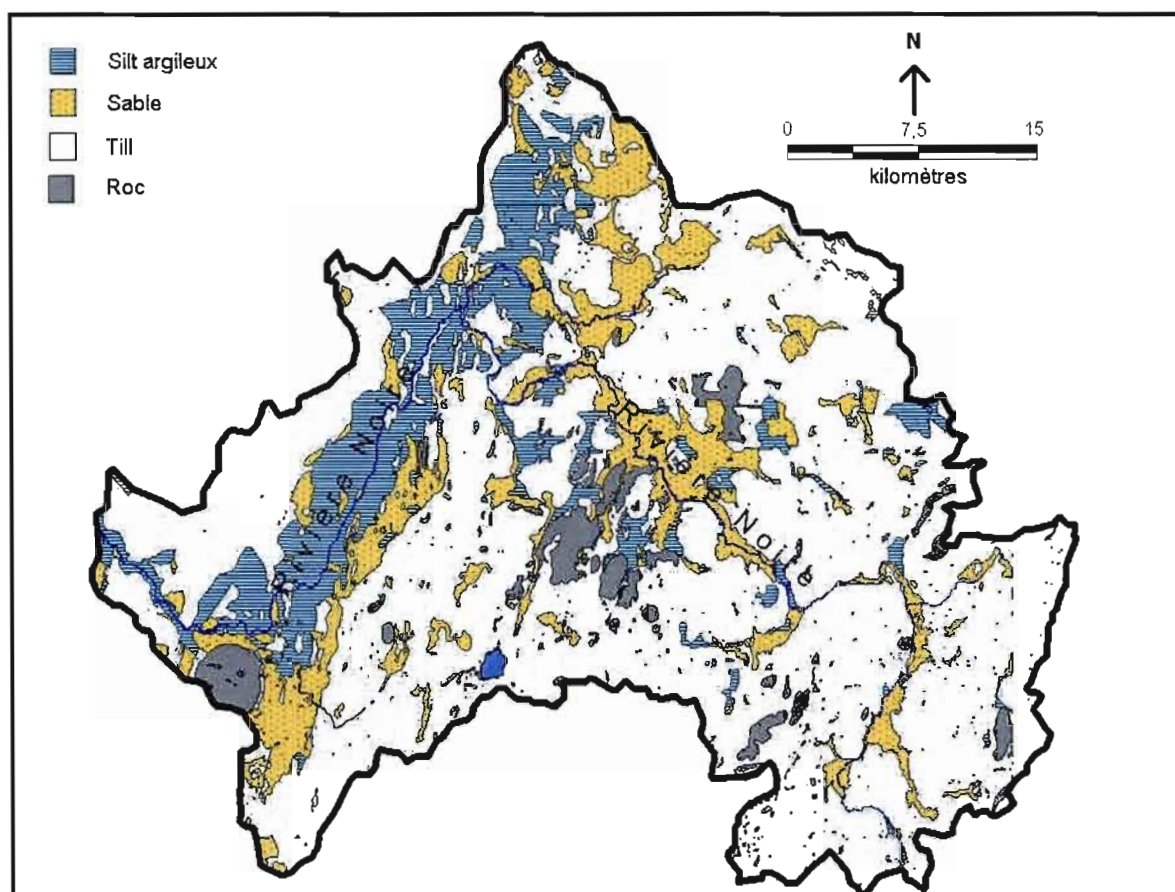


Figure 3.9 : Carte des dépôts de surface sur le bassin de la rivière Noire.

Le till recouvre 68 % du territoire à l'étude. Sur le terrain, des tills à matrice silteuse et d'autres à matrice sableuse ont été observés. Cette unité ne dépasse généralement pas 5 m d'épaisseur. Les dépôts de sable se localisent principalement dans les lits des affluents majeurs et de la rivière Noire sur le bassin. Cette unité recouvre 14 % de la superficie totale. Des épaisseurs totalisant 15 m ont été observées au centre du bassin. Aussi, une superficie

considérable de sable entoure le Mont Yamaska au sud-ouest du bassin. Le silt argileux se concentre dans la portion aval du bassin, soit au nord-ouest. Dans ce secteur, cette unité est présente dans le lit de la rivière Noire et couvre 12 % du bassin. Le roc affleurant ne représente que 4 % du bassin, mais est surtout localisé au centre et à l'amont du bassin.

Une description des dépôts sableux entourant le Mont Yamaska, faite par Prichonnet (1984), indique tout d'abord des sédiments littoraux et sublittoraux datant du Wisconsinien supérieur composés de graviers stratifiés à galets imbriqués à matrice sableuse. Ces dépôts pouvant atteindre de 1 à 10 m d'épaisseur sont situés au contact immédiat de l'intrusion rocheuse du Mont Yamaska appartenant au groupe des Montérégiennes. Puis, en périphérie, de cette unité se retrouvent des cordons littoraux formés de sable grossier à très fin entre 1 à 4 m d'épaisseur.

Des tests de perméabilité in situ au perméamètre de Guelph ont été réalisés sur des sols situés à l'aval sur le bassin de la rivière Noire (ruisseau des Aulnages) par Bolduc (2004). Ces tests ont montré des conductivités hydrauliques moyennes de $2,1 \times 10^{-4}$ m/s pour les dépôts sableux à $1,4 \times 10^{-9}$ m/s pour le silt argileux. La conductivité hydraulique du till a été évaluée à $7,0 \times 10^{-5}$ m/s. Dans la portion du bassin étudiée par cette étude, le silt argileux et le till semblent peu perméables et limitent probablement le transfert de la recharge à la nappe.

Dans le présent travail, les conductivités hydrauliques, évaluées à l'aide des perméamètres en laboratoire sur les échantillons de till prélevés en juillet 2004 ont une valeur moyenne de $5,4 \times 10^{-5}$ m/s (tableau 3.4). Il est important de noter que tous les échantillons prélevés ont été remaniés au moment de l'échantillonnage et ne représentent plus la structure naturelle du dépôt observée sur le terrain. Les conductivités hydrauliques des échantillons de till présentent une variabilité importante entre $1,25 \times 10^{-4}$ et $8,94 \times 10^{-6}$ m/s.

La discontinuité des dépôts de surface recouvrant l'aquifère, de même que leur générale perméabilité permet de dire que l'aquifère régional est généralement libre. Seule la portion aval de l'aquifère est captive localement, à la faveur de la présence du silt argileux.

Tableau 3.4: Conductivités hydrauliques des échantillons de till.

Échantillon	Conductivité hydraulique (m/s)
2	0,0000653
6	0,000125
11	0,0000598
13	0,000104
16	0,0000816
17	0,00000894
19	0,0000136
20	0,0000557
22	0,0000195
26	0,00000704
Moyenne	0,0000540
Écart-type	0,0000415

3.3 Géologie de sub-surface

La géologie du secteur correspond à une zone de transition entre les Basses-Terres du Saint-Laurent et les Appalaches (figure 3.10). Les roches du substratum correspondent à trois unités tectonostratigraphiques du piedmont appalachien déversées vers l'ouest-nord-ouest et le nord-ouest (Doiron, 1981). Premièrement, la Formation de Bourret (BO), mise en place à l'Ordovicien moyen et supérieur, occupe le nord-ouest de la zone d'étude et est composée d'ardoises, de calcaires argileux, de grès et de conglomérats. Deuxièmement, une bande de roches traversant l'ouest de la zone du nord au sud correspond à l'Olistostrome de Drummondville (OD) composé de schistes à blocs, datant de l'Ordovicien moyen et supérieur.

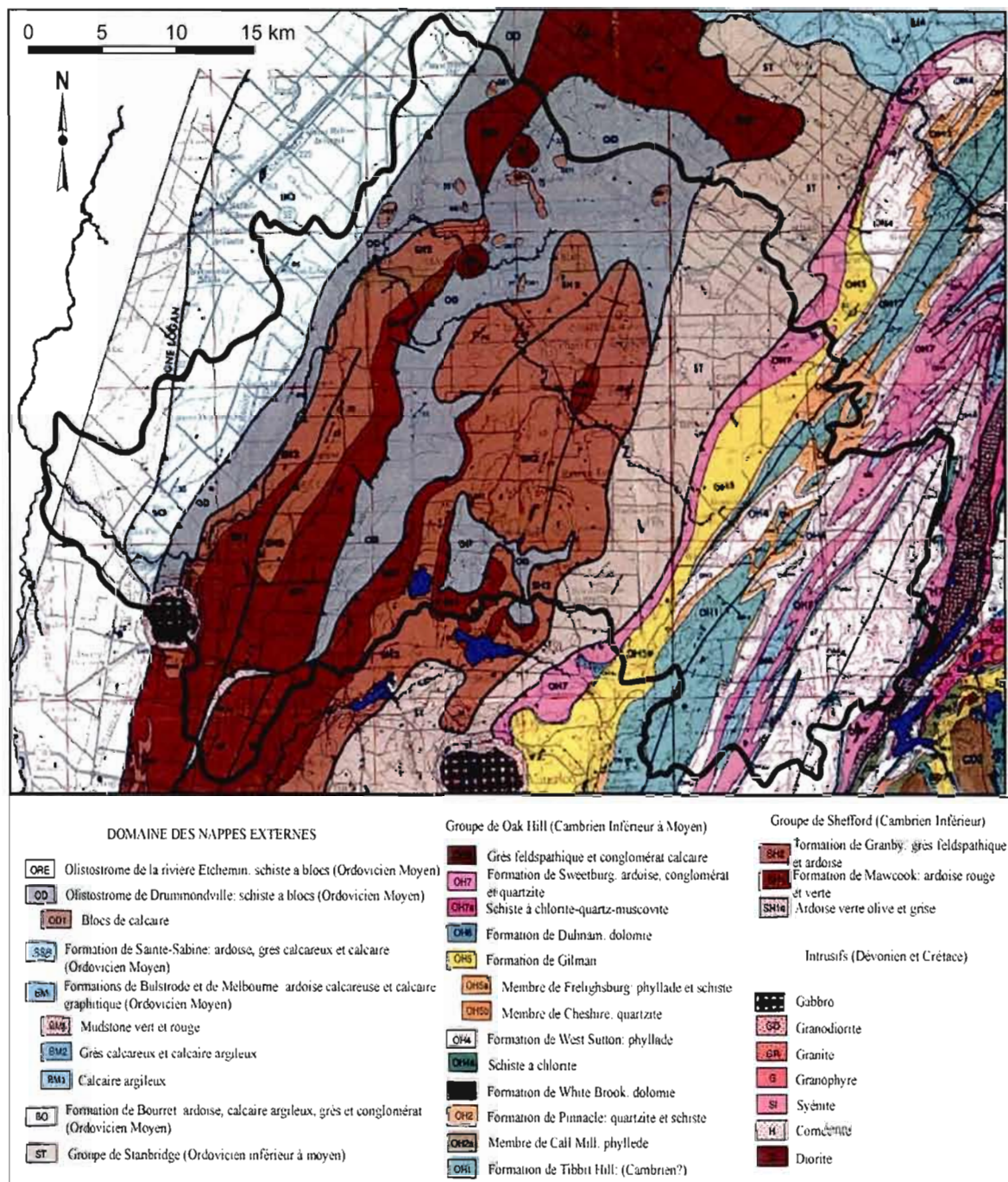


Figure 3.10 : Carte géologique de la zone d'étude (MRN – Québec, 1985)

Les roches du centre du bassin appartiennent au Groupe de Shefford (SH), déposé durant le Cambrien inférieur et moyen. Les Formations rocheuses de Granby et de Mawcook,

composées de grès feldspathique et d'ardoises rouges et vertes, occupent majoritairement le centre et le sud-ouest du bassin. Par la suite, une bande formée des roches appartenant au Groupe de Stanbridge, principalement composée de calcaire et d'ardoise, traverse le centre est du bassin suivant un axe sud-ouest nord-est. Finalement, la portion amont du bassin est caractérisée par une succession plissées des formations rocheuses du Groupe de Oak Hill (OH). Les formations identifiées sur le bassin appartenant à ce groupe correspondent à celles de Tibbit Hill, Pinnacle, West Sutton, Gilman et Sweetburg majoritairement des phyllades, ardoises, dolomies et quartzites.

L'étude géophysique par résistivité électrique réalisée par Djineng Njomo (2002) sur un secteur très local situé à l'aval sur le territoire d'étude, a mis en évidence la présence d'une couche plus transmissive entre 10 et 15 m de profondeur. Le modèle calé par Bolduc (2004) utilise également une transmissivité du roc plus grande en surface, justifiée par sa fracturation et son altération. Ces résultats laissent croire que l'eau circule plus facilement à la surface du roc qu'en profondeur et qu'elle est également plus sollicitée dans cette partie de l'aquifère.

Le socle rocheux du sous-bassin est reconnu pour être très fracturé puisqu'il se situe à la limite géologique de la chaîne de montagnes appalachiennes et des Basses-Terres du Saint-Laurent. D'ailleurs, plusieurs failles majeures sillonnent effectivement le roc tel qu'observé sur la figure 3.10. Entre autre, la faille de Logan traverse le territoire à l'ouest, dans le secteur aval du bassin, tout juste à l'ouest du Mont Yamaska. L'aquifère étudié ne présente aucune limite géologique connue, intérieure ou extérieure aux limites du bassin versant de la rivière Noire.

L'étude hydrogéologique menée sur le bassin de la Yamaska par Paré (1978) a fourni 11 valeurs de transmissivités du roc obtenues par essai de pompage, dont la moyenne est de $5,66 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Bolduc (2004) a aussi réalisé des essais de pompage à partir de deux puits au roc qui ont permis d'évaluer sa transmissivité à environ $5,0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

3.4 Piézométrie du bassin versant

3.4.1 La carte piézométrique régionale

Une carte piézométrique régionale fut tracée (MapInfo) à partir des données de puits issues du Système d'Informations Hydrogéologique (SIH) (MDDEP, 2005) et des niveaux d'eau souterraine relevés en mai 2003. La carte piézométrique constitue l'outil de base en hydrogéologie pour identifier les gradients hydrauliques d'une nappe et les directions de l'écoulement. Plusieurs investigations qualitatives et quantitatives ont été menées à partir de la carte régionale pour préciser les écoulements souterrains d'un bassin.

Il est important de noter que les données du SIH peuvent être considérées comme étant empreintes d'une incertitude pouvant atteindre plusieurs mètres. Ces erreurs proviennent de différentes sources : dates de mesures étalées sur plusieurs décennies et sur toute l'année, erreurs de saisie de l'information (localisation du forage, profondeur du forage, lecture du niveau de l'eau) et hétérogénéité du milieu fracturé. Néanmoins, toutes les données issues du SIH et celles mesurées en mai 2003 ont été utilisées pour tracer la carte piézométrique.

La figure 3.11 illustre la carte piézométrique régionale du bassin. Elle représente les niveaux de l'aquifère avec des intervalles de 10 m. Les niveaux piézométriques observés sur le bassin se situent entre 30 et 480 m. L'amont du bassin hydrogéologique se trouve à son extrémité sud-est. Le réseau hydrographique principal est également illustré.

Les limites du secteur amont du bassin coïncident approximativement avec des crêtes piézométriques, ce qui implique que les limites du bassin de surface correspondent effectivement à des lignes de partage des eaux souterraines. Toutefois, les courbes piézométriques au nord et au sud-ouest du bassin indiquent des secteurs où les bassins versants de surface et souterrain ne concordent pas (cercles pointillés sur la figure 3.11) puisque les courbes piézométriques n'indiquent pas de crêtes, soit de lignes de partage des eaux souterraines. Cette observation montre qu'il existe des connexions hydriques entre l'eau souterraine du bassin versant, celle qui est en lien hydraulique avec la rivière, et un

aquifère de plus grande dimension qui s'écoulerait dans les couches plus profondes suivant la direction dominante du sud-est vers le nord-ouest. Des connexions hydriques avec cet aquifère régional existent sans doute également au nord-est du bassin. Les crêtes piézométriques observées aux limites du bassin versant topographique correspondent probablement à un écoulement souterrain superficiel, dû à la recharge de l'aquifère dans les secteurs d'altitude plus élevée tel que l'écoulement de type local introduit dans la théorie des systèmes d'écoulement multiples régionaux de Toth (1963). Les limites du bassin hydrographique ne coïncident donc pas intégralement aux limites de l'aquifère.

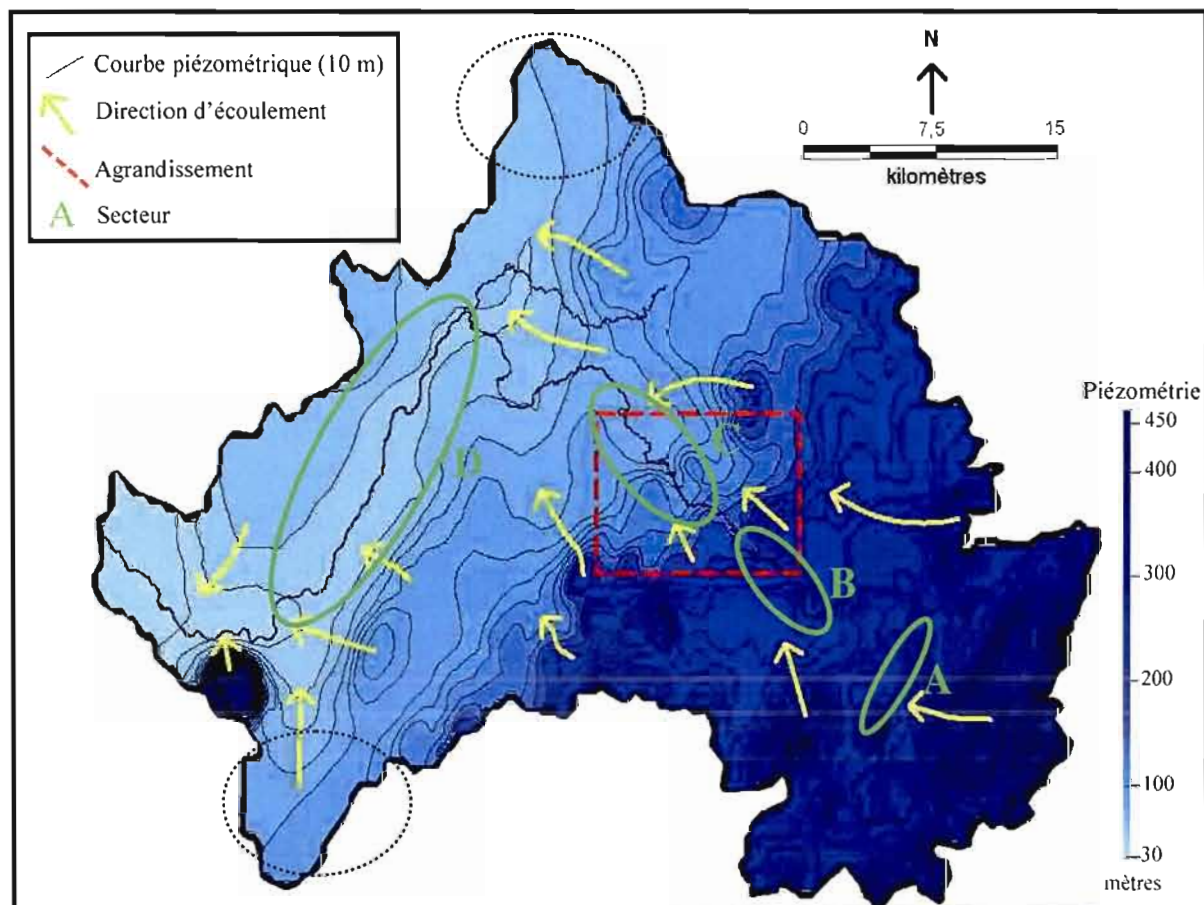


Figure 3.11 : Piézométrie régionale (intervalles de 10 m) sur le bassin de la rivière Noire et directions des écoulements souterrains.

La réalisation de la carte piézométrique du bassin de la rivière Noire démontre que l'écoulement de l'eau souterraine s'oriente du sud-est vers le nord-ouest (figure 3.11). Cette direction d'écoulement correspond à la tendance régionale sur le bassin de la Yamaska (Paré, 1978). Toutefois, en faisant un gros plan sur la carte piézométrique près du lit de la rivière Noire (figure 3.12), on dénote l'influence locale de celle-ci sur l'écoulement souterrain superficiel. Les directions d'écoulements s'orientent vers la rivière démontrant ainsi qu'il existe des connexions hydriques entre l'aquifère et le cours d'eau principal du bassin hydrologique. Cette relation semble se retrouver tout le long de la rivière Noire, mais varie en intensité selon les secteurs.

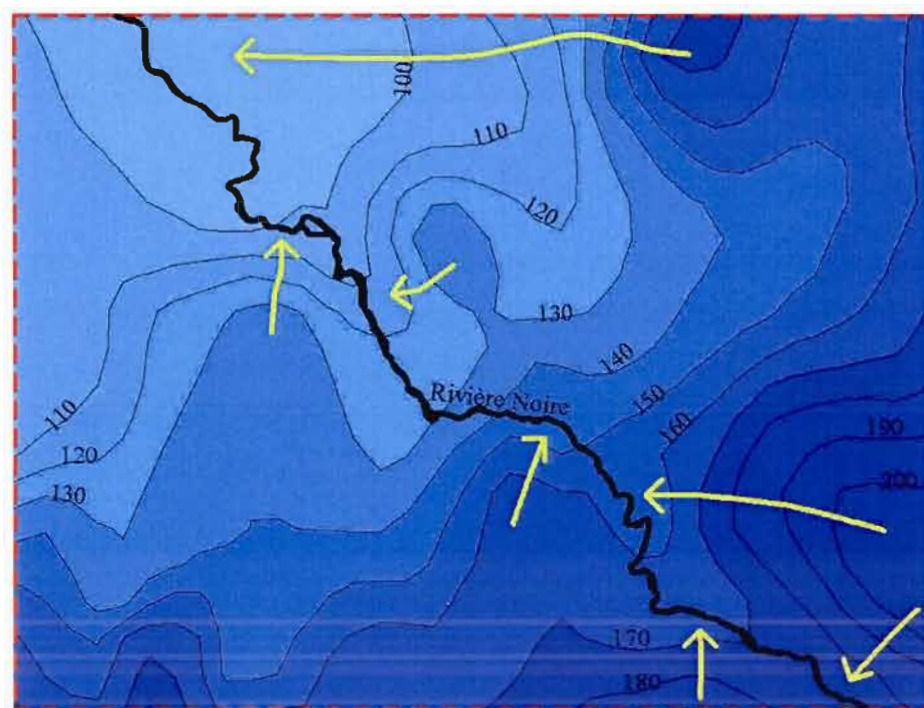


Figure 3.12 : Agrandissement de la carte piézométrique (10m) des directions d'écoulement locales.

Les frontières des sous-bassins hydrologiques furent superposées à la carte piézométrique (figure 3.13). Sur certains sous-bassins, les directions d'écoulement souterrain subissent visiblement l'influence locale des affluents de la rivière Noire et donc de la topographie. En amont, le dénivelé topographique semble responsable des directions d'écoulement orientées

vers la rivière Noire. Les limites des sous-bassins hydrologiques correspondraient donc à des sous-bassins aquifères : systèmes d'écoulement locaux (Toth, 1963) puisque les directions de drainage de surface et de l'écoulement souterrain superficiel concordent. L'étendue verticale de ces sous-bassins demeure toutefois inconnue.

Au centre du bassin, les directions d'écoulement s'orientent encore visiblement vers le drain principal du bassin, soit la rivière Noire. Néanmoins, de légères déviations locales sont observées près des lits des cours d'eau secondaires (figure 3.12). Finalement, en aval du bassin, la rivière Noire influence les directions d'écoulement souterrain près de son lit, mais perd son emprise pour les écoulements souterrains aux pointes nord, sud-ouest et ouest du bassin. À ces endroits, le dénivelé topographique est faible, et tel que mentionné précédemment, la connexion hydrique avec un aquifère de plus grande dimension est probable. En résumé, dans certains secteurs, la rivière Noire a l'influence d'un drain sur l'écoulement souterrain (ellipses vertes sur la figure 3.11) alors que dans d'autres secteurs, le lien entre l'écoulement de surface et l'écoulement souterrain est moins évident.

À l'échelle du bassin versant, la nature des dépôts de surface (figure 3.9) ne semble pas influencer les directions d'écoulement régionales ou locales : la rivière Noire exerce donc une influence similaire là où les dépôts de till, de sable ou de silt argileux sont présents à la surface. Cette influence varie néanmoins de l'amont à l'aval du bassin, tel que le montrent les directions d'écoulement observées sur la figure 3.11. Les gradients hydrauliques sont aussi très variables dans l'espace à l'approche de la rivière Noire. Ces variations spatiales sont probablement dues en partie à des variations de la topographie et à des variations locales de la conductivité hydraulique du roc.

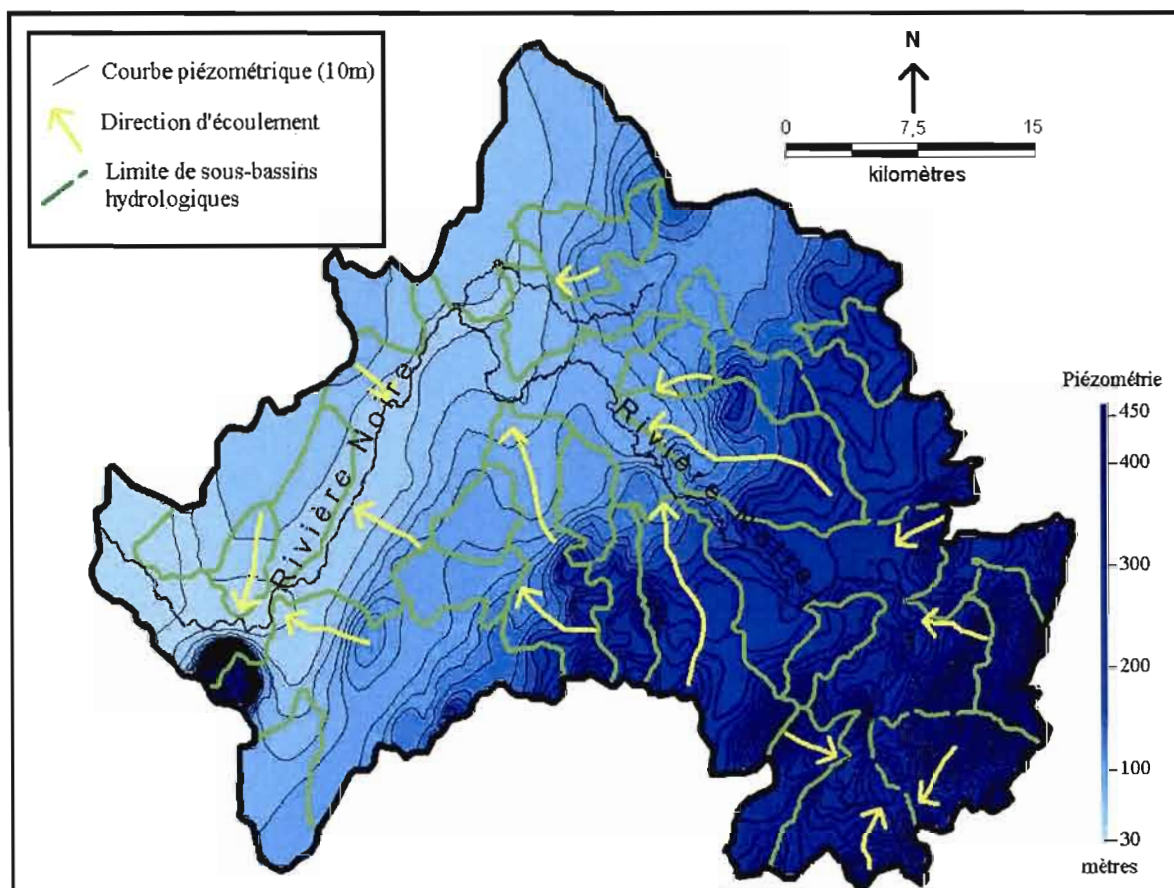


Figure 3.13 : Relation entre les sous-bassins aquifères et les sous-bassins hydrologiques.

3.4.2 Coupes piézométriques

Des coupes piézométriques transversales du bassin ont été réalisées à partir de la combinaison des données topographiques, piézométriques régionales et géologiques. La première coupe A-A' est orientée ONO-ESE, soit de l'aval vers l'amont du bassin (figure 3.14). Les plus grandes variations d'altitudes du bassin y sont représentées. La seconde coupe B-B' croise perpendiculairement la première et présente les écoulements sur un plan SSO-NNE du bassin (figure 3.14).

Les puits provenant du SIH sont représentés sur les figures. Les dépôts de surface indiqués sur les coupes proviennent de la carte des dépôts de surface simplifiée (figure 3.9) et des descriptions de la base de données du SIH. Les secteurs ayant fait l'objet d'une interprétation particulière (crête topographique et absence de forage) sont indiqués par des « ? » sur chacune des coupes. Les gradients hydrauliques (apparents puisque l'axe n'est pas parfaitement perpendiculaire aux courbes piézométriques) indiquent les directions d'écoulement souterrain locales, de même que la direction régionale de l'eau souterraine pour chacune des sections.

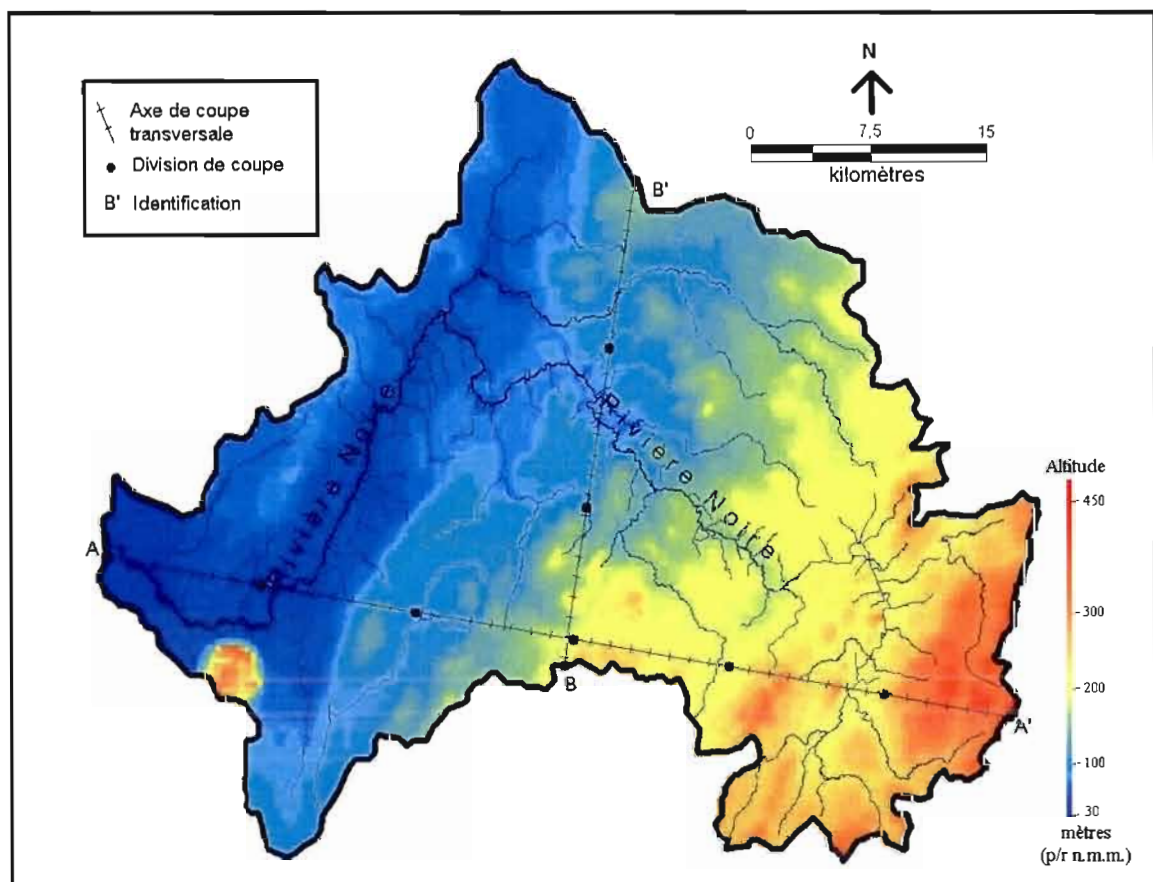


Figure 3.14 :Localisation et orientation des coupes transversales.

Les coupes A-A' et B-B' ont été divisées en section de 10 km afin d'observer plus en détails les particularités topographiques et piézométriques du bassin. Elles sont présentées à l'annexe I.

La figure 3.15 illustre la coupe piézométrique A-A'. Le dénivelé topographique est de 450 m. La rivière Noire croise le tracé transversal en deux endroits, vers l'aval du bassin et dans la zone la plus en amont. La différence de niveau piézométrique entre l'amont et l'aval est importante et la piézométrie suit la topographie sur l'ensemble de la coupe. Le dénivelé piézométrique de la coupe est de l'ordre de 430 m. Le gradient hydraulique régional de ce plan de coupe du bassin est de 0,0075 m/m.

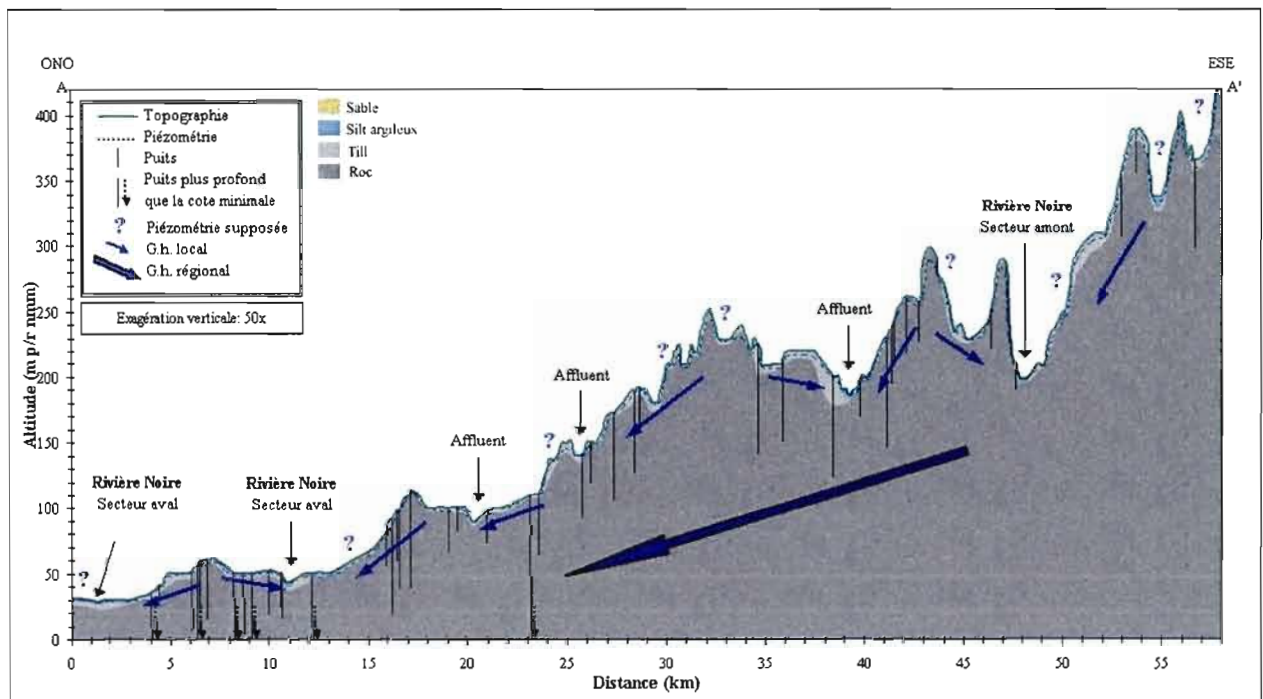


Figure 3.15 : Coupe transversale A-A'.

La coupe transversale B-B' représente le bassin de la rivière Noire dans un axe perpendiculaire à la coupe précédente (figure 3.16). Cet axe de coupe se rapproche du profil perpendiculaire à la direction d'écoulement régional observée sur le bassin. La même échelle fut utilisée pour les coupes A-A' et B-B' afin d'en apprécier les différences. La

rivière Noire coule au centre du tracé B-B' (figure 3.16). Le gradient hydraulique régional et apparent de ce plan de coupe est plus prononcé au sud-sud-ouest (0,0083) qu'au nord-nord-est (0,0036). Le dénivelé topographique de la coupe est de l'ordre de 135 m.

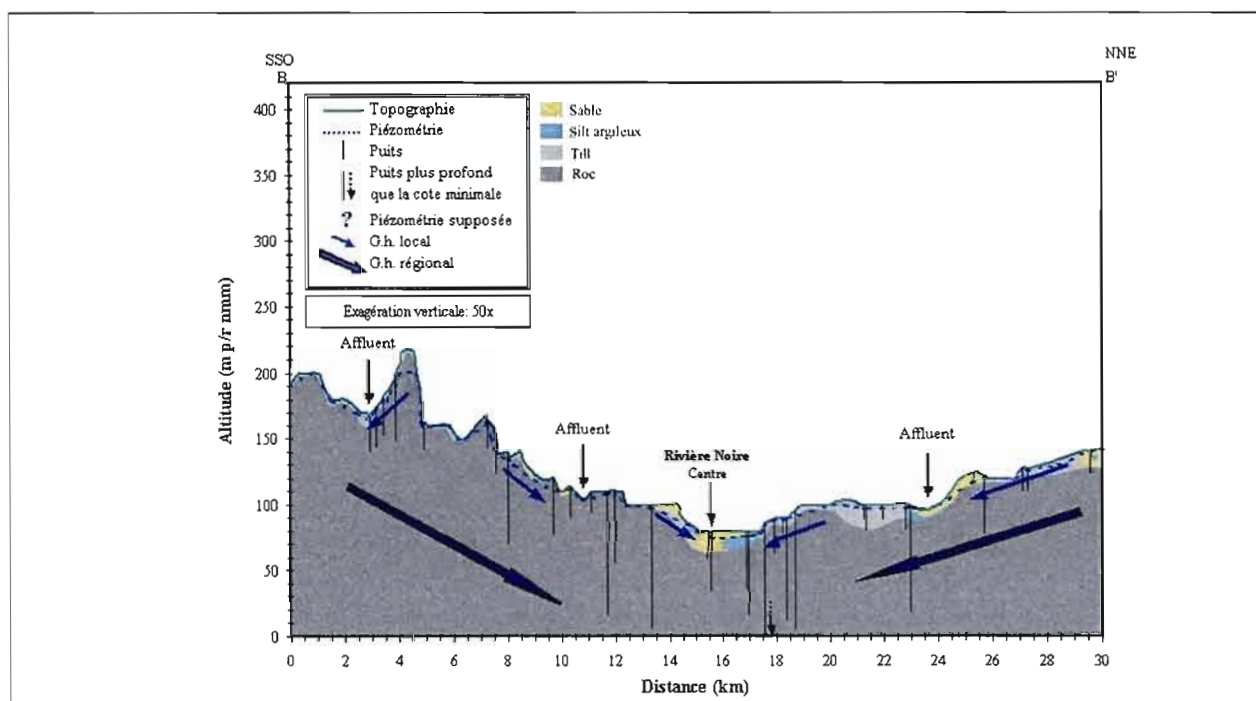


Figure 3.16 : Coupe transversale B-B'.

La concordance entre la topographie et le niveau piézométrique s'avère être la principale constatation établie par la réalisation des coupes transversales sur le bassin de la rivière Noire. En effet, le niveau piézométrique suit de près la topographie sur l'ensemble du bassin, et ce, malgré les irrégularités du terrain. Les secteurs où ce lien est moins fort s'expliquent probablement par des incertitudes et des imprécisions ponctuelles causées à un manque de données. Les deux coupes confirment que la rivière Noire agit comme un drain sur la nappe. Certains des affluents de la rivière Noire (identifiés par des flèches sur les coupes) semblent être aussi reliés hydrauliquement avec la nappe, mais semblent exercer seulement un effet local seulement sur le drainage de la nappe.

La piézométrie élevée et près de la surface sur l'ensemble du territoire suggère que la recharge est présente sur tout le bassin, à l'exception du secteur aval où des dépôts de silt argileux sont présents en surface. Néanmoins, il faut prendre en compte qu'une grande superficie en amont du bassin correspond à un socle rocheux très fracturé, associé à l'orogène des Appalaches. Dans ce secteur, le roc est souvent affleurant et fracturé laissant libre cours à l'infiltration des précipitations. À l'amont du bassin il y a donc un apport important d'eau à la nappe, ce qui contribue à maintenir un niveau piézométrique élevé dans le secteur sud-est. La concordance de la topographie et de la piézométrie à l'aval du bassin s'explique également par une épaisseur de roc plus conducteur près de la surface (Bolduc, 2004 ; Djineng Njomo, 2002). La reconnaissance que la topographie influence les systèmes régionaux d'écoulements souterrains date des années 1960 et 1970 selon Toth (2005).

Les dépôts de surface recouvrant le socle rocheux du bassin s'étendent de manière discontinue sur le territoire, principalement en amont et au centre sud du bassin où les dépôts de sable et surtout de till sont plus abondants. De plus, ces dépôts recouvrent le roc en épaisseurs variables, mais généralement de faible importance, sauf en aval où des épaisseurs pouvant atteindre 15 m ont été observées. Les coupes confirment que sur l'ensemble du territoire, les dépôts de surface ne jouent qu'une influence superficielle sur l'écoulement souterrain et que celle-ci n'est pas visible sur les coupes piézométriques.

3.5 Évaluation quantitative de la contribution des écoulements souterrains à la rivière Noire

La contribution des écoulements souterrains à la rivière Noire a été estimée par Gauthier (2003). Cette étude a évalué la contribution de l'aquifère aux débits dans la rivière Noire à l'exutoire du bassin versant (station 30304 et 104 km de rivière, à 7 km de l'exutoire) à 11,2 m³/s et aux débits à la station 30339 (59 km de rivière) à 4,65 m³/s. Sur un tronçon de rivière de 14,7 km, Bolduc (2004) a estimé la contribution de la nappe à 0,84 m³/s à l'aide de la modélisation hydrogéologique. Il avait alors observé que ce débit de base était inférieur à celui calculé par Gauthier (2003), qui estimait un débit de base de 0,18 m³/s par

km de rivière sur le même tronçon, soit $2,69 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la même distance. Cette différence a été attribuée à des variations locales d'alimentation de la rivière Noire par les eaux souterraines, à des effets de la simplification du modèle réalisé ou encore à une surestimation du débit de base estimé par le filtre de Chapman.

Les cartes et les coupes piézométriques ont montré l'influence marquée de la rivière Noire sur l'écoulement souterrain régional de l'ensemble du bassin, mais avec une variation spatiale des liens entre la rivière et la nappe. Les affluents de la rivière Noire semblent drainer la nappe, mais leur influence est locale. Les volumes drainés par les affluents sont supposés faibles en comparaison avec ceux drainés par la rivière Noire. Une évaluation quantitative de la contribution des écoulements souterrains à la rivière Noire a été réalisée dans les secteurs où celle-ci draine l'aquifère (voir ellipses vertes sur la figure 3.11). Cette évaluation fut calculée à l'aide de l'équation de Darcy et de plusieurs hypothèses simplificatrices. Un gradient hydraulique moyen a d'abord été estimé dans chaque zone, entre le lit de la rivière et une distance de 500 m perpendiculaire à celle-ci. L'épaisseur de la zone a été estimée sur la base des résultats de géophysique obtenus par Djineng Njomo (2002) et selon lesquels la zone plus transmissive aurait une épaisseur de 10 à 15 m. La longueur de la zone a été mesurée directement sur la carte topographique. Les conductivités hydrauliques rapportées par Bolduc (2004) et Paré (1978) ont été utilisées.

Les débits des écoulements souterrains ainsi obtenus sont présentés au tableau 3.5 et le tableau 3.6 compare les débits de estimés avec les différentes méthodes (dans ce tableau les variations obtenues par le filtre de Chapman reflètent des variations interannuelles).

Tableau 3.5: Écoulement de Darcy, à la station 030304.

Station	Zone	Gradient hydraulique (m/m)	Longueur de rivière associée (m)	Épaisseur de l'aquifère (m)	Débit de base selon Darcy (m³/s)	
					K :6 x 10 ⁻⁵ m/s (Paré, 1978)	K :1,5 x 10 ⁻⁴ m/s (Bolduc, 2004)
030304	A	0,034	19 000	10	0,39	0,97
				15	0,58	1,45
	B	0,023	13 000	10	0,18	0,45
				15	0,27	0,67
	C	0,025	10 000	10	0,15	0,38
				15	0,23	0,56
	D	0,015	21 000	10	0,19	0,47
				15	0,28	0,71
	Total			10	0,91	2,27
				15	1,36	3,40

Tableau 3.6: Comparaison des débits de base estimés.

Station	Résultat	Évaluation avec Darcy	Filtre de Chapman (Gauthier, 2003)	Modélisation (Bolduc, 2004)
		Débit (m ³ /s)/km	Débit de base (m ³ /s)/km	Débit (m ³ /s)/km
030339	moyen	0,028	0,082	--
	maximum	0,047	0,12	--
	minimum	0,013	0,059	--
030304	moyen	0,019	0,12	0,057
	maximum	0,033	0,19	--
	minimum	0,0089	0,077	--

La contribution de la nappe souterraine à la rivière Noire par la méthode de Darcy (tableaux 3.5 et 3.6), est inférieure à celle estimée par Gauthier (2003). L'évaluation de la contribution

des secteurs amont de la station 030339 présente un moins grand écart entre les deux méthodes qu'à l'aval du bassin. Avec la modélisation d'une portion à l'aval du bassin, Bolduc a obtenu une contribution de la nappe à la rivière Noire de $0,057 \text{ m}^3/\text{s}$ par km après calage. Bien que plus élevée, cette valeur est plus près de celle obtenue avec l'évaluation de Darcy que de celle obtenue par le filtre de Chapman. La sous-estimation globale des débits de base du bassin, calculé à l'aide de Darcy, peut provenir de plusieurs facteurs :

1. Les zones où l'aquifère contribue à la rivière sont plus nombreuses que celles identifiées à la figure 3.11.
2. La contribution aux échanges nappe - rivière des tributaires n'est pas considérée.
3. Il y a sous-évaluation des conductivités hydrauliques du roc de surface à l'amont du bassin.
4. L'incertitude de l'épaisseur de la couche du roc plus conductrice sur l'ensemble du bassin, de même que la variabilité de cette épaisseur le long du tracé de la rivière Noire.
5. La contribution d'une épaisseur de dépôts meubles conducteurs sur l'ensemble du parcours n'a pas été considérée.

L'évaluation des débits d'eau souterraine provenant de la nappe vers la rivière Noire n'a pas permis d'obtenir des résultats concluants sur l'ensemble du bassin. Néanmoins, elle a permis d'apprécier la variabilité spatiale des apports de l'eau souterraine à la rivière Noire.

3.6 Recharge de l'aquifère

Tel que mentionné précédemment, le principe utilisé pour l'évaluation de la recharge relève du fait que l'écoulement en rivière correspond à la sommation de l'eau provenant du débit de base et du ruissellement de surface. En isolant le débit de base à l'aide d'un filtre mathématique (i.e. Chapman), la contribution de la nappe à la rivière est estimée. En appliquant ce raisonnement aux débits annuels, et sachant que le bassin versant a une superficie de 1579 km^2 , la recharge annuelle moyenne de la nappe du bassin de la rivière

Noire est estimée à 224 mm/an (tableau 3.7). En tenant compte de la variabilité inter annuelle des débits de base, les recharges maximale et minimale estimées par cette méthode correspondent à 368 et 111 mm/an.

Tableau 3.7 : Intervalles de recharge possible.

Station	Résultat	Débit de base (Gauthier, 2003) (m ³ /s)	Recharge (mm/an)
030339	minimum	3,37	67,3
	maximum	6,57	131,2
	moyen	4,65	93,0
030304	minimum	5,53	110,5
	maximum	18,46	368,4
	moyen	11,21	223,8

À partir de ce résultat, plusieurs scénarios de distribution spatiale d'infiltration et de recharge ont été évalués puis comparés. Le bassin a été réparti en trois secteurs : secteur amont (265 km²), secteur centre (1125 km²) et secteur aval (190 km²). La répartition des secteurs est illustrée à la figure 3.17. Ces secteurs furent délimités selon la nature des dépôts de surface et les propriétés du roc.

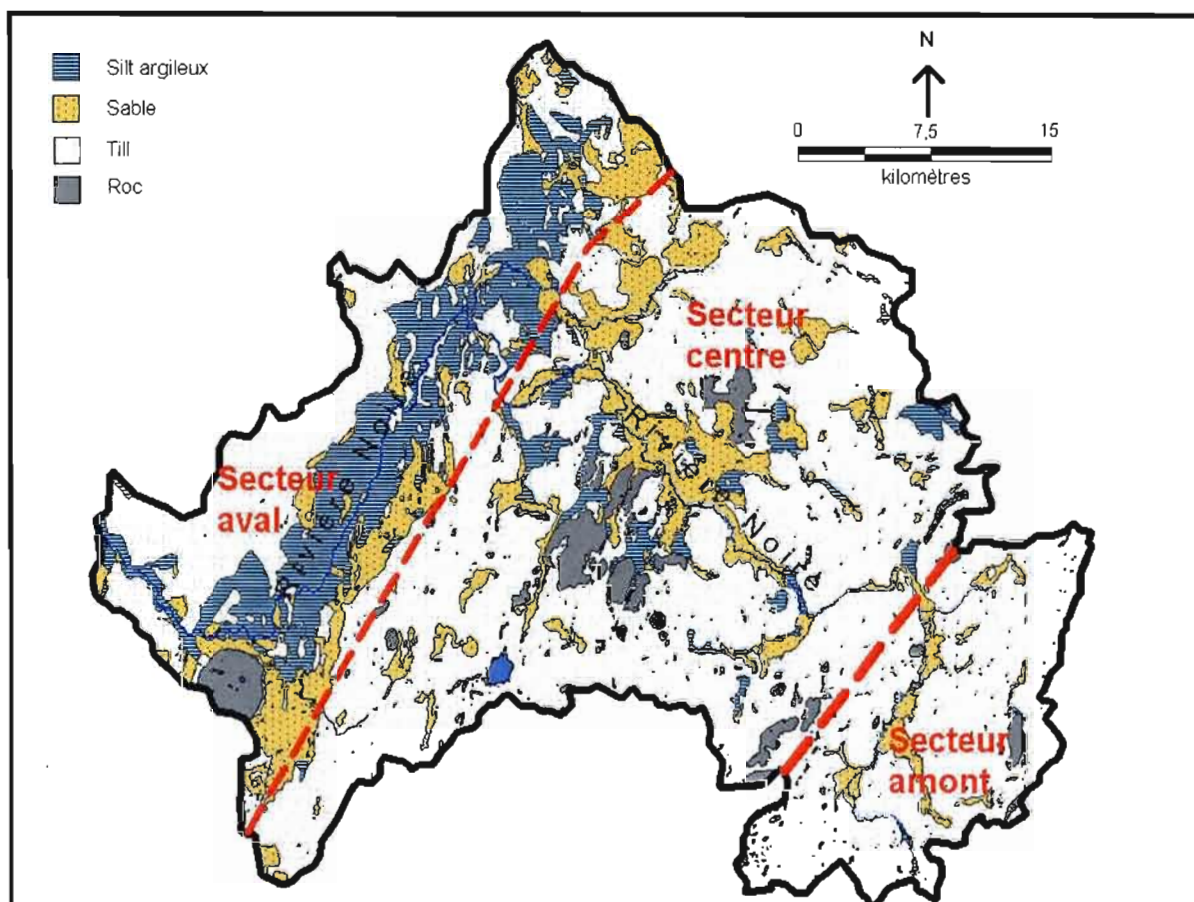


Figure 3.17 : Distribution spatiale de la recharge.

3.7 Discussion

La concordance du relevé piézométrique et de la topographie sur l'ensemble du bassin a été mise en évidence par les coupes transversales du bassin. Des systèmes d'écoulement locaux et régionaux, tel que décrit par Toth (1963), ont été identifiés par ces coupes. La présence d'une couche superficielle de roc plus conductrice près de la surface de l'aquifère, additionnée à une topographie marquée, demeure l'explication la plus probable pour expliquer le fait que les niveaux piézométriques soient aussi près de la surface dans le secteur d'altitude la plus élevée. Il est aussi possible que l'infiltration se fasse plus facilement dans cette zone (roc très fracturé en surface) qui contribuerait alors de manière

plus significative à la recharge de l'aquifère. Le fait que la topographie est le facteur dominant l'écoulement régional a été observé par Subagyono et al. (2005), Cloutier et al. (2001), Baven et Kickby (1979), O'Loughlin (1986). Ces conclusions

Les conductivités hydrauliques mesurées sur les échantillons de till, qui présentent une moyenne de $5,40 \times 10^{-5}$ m/s, sont du même ordre de grandeur que celles évaluées sur le terrain par Bolduc (2004). Cependant, elles sont plus élevées que celles obtenues après calage d'un modèle d'écoulement par Bolduc (2004). Cet écart pourrait s'expliquer par la nature des dépôts de surface beaucoup moins perméables sur le domaine d'étude restreint de Bolduc (2004) que sur l'ensemble du bassin versant.

L'évaluation de la contribution de la nappe d'eau souterraine à la rivière Noire à l'aide d'hypothèses simplificatrices et de l'équation de Darcy n'a pas permis de quantifier complètement cet apport. Beaucoup d'imprécisions sont incluses dans la méthode. Il est possible que des zones de contribution de la nappe à la rivière n'aient pas été identifiées sur la carte piézométrique. Il est aussi possible que les affluents de la rivière Noire, non considérés dans cet estimé, drainent un volume d'eau non-négligeable de la nappe. Aussi, l'intervalle d'épaisseur testée de la couche de roc plus conductrice n'est probablement pas représentative du roc à l'amont du bassin, où les unités géologiques ont davantage subi l'orogène des Appalaches. Cette évaluation pourrait néanmoins être appliquée avec succès sur un bassin versant plus homogène.

La recharge sur le bassin correspond à un volume d'eau moyen entre 224 mm/an, selon les débits de base calculés par le biais de Chapman, et 292 mm/an en se basant sur un bilan hydrique du bassin. La distribution spatiale de la recharge a été répartie en trois secteurs distincts. La recharge est supposée plus importante à l'amont du territoire à l'étude et diminue en importance à l'aval du bassin où des dépôts imperméables ont été identifiés. De façon générale, l'aquifère est de nature libre.

3.8 Conclusion

Les dépôts de surface sont de faibles épaisseurs et ont peu d'effet sur les directions d'écoulement locales ou régionales. Celles-ci semblent principalement régies par le roc, sa topographie, de même que ses propriétés hydrauliques.

L'étude des niveaux piézométriques sur le bassin de la rivière Noire a permis de conclure que la direction régionale de l'écoulement d'eau souterraine s'oriente vers le nord-ouest. La principale source de recharge de l'aquifère provenant du sud, le temps de séjour de l'eau souterraine augmente généralement du sud-est vers le nord-ouest. La réalisation de la carte piézométrique et son étude approfondie révèlent l'influence de la rivière Noire et de certains de ses affluents majeurs sur l'écoulement souterrain superficiel. L'étude de la piézométrie n'a pas permis de quantifier complètement la contribution de la nappe à la rivière Noire, mais elle permet toutefois d'établir un ordre de grandeur des contributions de la nappe à l'échelle du bassin.

CHAPITRE IV

GÉOCHIMIE DE L'AQUIFÈRE

La géochimie fut choisie comme outil pour la détermination des directions d'écoulements en se basant sur l'hypothèse que les caractéristiques géochimiques d'une masse d'eau varient en fonction du temps de son séjour dans l'aquifère. Ainsi, l'eau récemment infiltrée dans l'aquifère possède des propriétés géochimiques différentes de l'eau qui y aurait séjourné plus longtemps. Les résultats des analyses d'eau ont donc été utilisés afin d'évaluer l'âge relatif de l'eau retrouvée à la grandeur du bassin, et ainsi en déduire les directions d'écoulement souterrain. Dans ce chapitre, la présentation des résultats d'analyses d'eau (pH, conductivité électrique, ions majeurs, nitrates et isotopes stables) est d'abord réalisée. Les résultats sont ensuite interprétés et discutés.

Pour la présentation des résultats, les échantillons provenant de sources furent considérés comme étant des résurgences d'eau souterraine de surface, et furent donc compilés parmi les puits de surface. L'unique échantillon issu d'une pointe filtrante a lui aussi été compilé parmi les puits de surface étant donné la faible profondeur du prélèvement.

4.1 Connaissances préalables sur la géochimie de l'eau sur le bassin versant

Le bassin de la rivière Yamaska, incluant le bassin de la rivière Noire, a déjà et fait toujours l'objet de plusieurs recherches scientifiques vouées à l'hydrologie et à l'environnement. La qualité de l'eau de surface et souterraine de sept bassins versants en surplus de fumier, dont celui de la rivière Yamaska, a été investiguée dans une étude menée par le Ministère de l'Environnement du Québec (MENV, 2004). Cette étude a permis d'établir que la

proportion de puits dont l'eau présente une concentration d'au moins 3 mg N-NO₃/L est significativement plus élevée dans les zones d'agriculture intensive que dans les zones non agricoles. L'activité en surface a des répercussions sur l'eau souterraine qui se manifestent clairement en termes de nitrates. Cependant, ces répercussions sont plus faibles dans le cas des puits profonds que dans celui des puits de surface. De plus, cette étude a montré que la qualité de l'eau mesurée est pratiquement constante et que les faibles variations temporelles ne sont pas liées aux activités saisonnières. Selon le Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP) (MDDEP, 2005), l'eau destinée à la consommation doit avoir une concentration en nitrate inférieure à 10 mg N-NO₃/L.

Bolduc (2004) a mis en évidence la grande vulnérabilité de l'eau souterraine à la contamination par les nitrates dans un secteur situé à l'aval sur le bassin de la rivière Noire. Selon cette étude, deux des 27 puits échantillonnés ont eu des concentrations en nitrates supérieures à 10 mg N-NO₃/l et dix ont excédé 1 mg N-NO₃/l, signes d'une concentration anthropique dans le secteur étudié.

Paré (1978) a réalisé une analyse géochimique de l'eau souterraine sur 213 puits situés sur le bassin de la Yamaska. Cette étude s'est traduite par le tracé d'une carte sur la circulation et les propriétés des eaux souterraines à l'échelle du bassin versant. La qualité générale de l'eau n'a fait l'objet d'aucun texte ou commentaire de la part de l'auteur. Toutefois, l'analyse des ions majeurs a montré que l'eau est majoritairement de type bicarbonatée calcique, avec certains échantillons de type bicarbonatée calcique magnésienne ou bicarbonatée sodique (secteur nord-ouest du bassin de la rivière Noire).

4.2 Résultats de pH et de conductivité électrique

Les valeurs de pH mesurées aux stations d'échantillonnage varient entre 6,15 et 9,11. Les pH de l'eau de surface et des puits de surface ont une gamme de variation similaire tandis que les pH des puits profonds varient plus dans l'espace. Le sommaire des résultats est

présenté au tableau 4.8 tandis que l'ensemble des données peuvent être consultées à l'annexe 2.

Tableau 4.8 : Valeurs de pH mesurées aux stations d'échantillonnage.

Type de stations	Nb stations	Gamme de valeurs de pH	Moyenne
Eau de surface	13	6,40 – 8,50	7,47
Puits de surface	16	6,30 – 8,70	7,30
Puits profond	54	6,15 – 9,11	7,59

La figure 4.18 montre la répartition géographique des pH relevés sur le bassin de la rivière Noire. Seules les données provenant des puits (de surface et profonds) ont été utilisées pour la figure. Les valeurs de pH obtenues pour les cours d'eau et la rivière Noire sont illustrées pour fins de comparaison. En observant la figure 4.18, les pH les plus bas se situent surtout au sud-est du bassin (dans la zone amont). Les valeurs les plus élevées se situent au nord du bassin. Les données de pH de l'eau de surface ne suivent pas intégralement celles des eaux souterraines du bassin. Le pH de l'eau de surface est plus bas en amont et plus élevé au centre et à l'aval du bassin.

Le sommaire des valeurs de conductivités électriques mesurées aux stations d'échantillonnage est présenté au tableau 4.9. Les conductivités sont les plus élevées et aussi plus variables dans les puits profonds. La conductivité électrique moyenne des eaux de surface est plus faible que celle des puits de surface. Les données détaillées sont répertoriées à l'annexe 2.

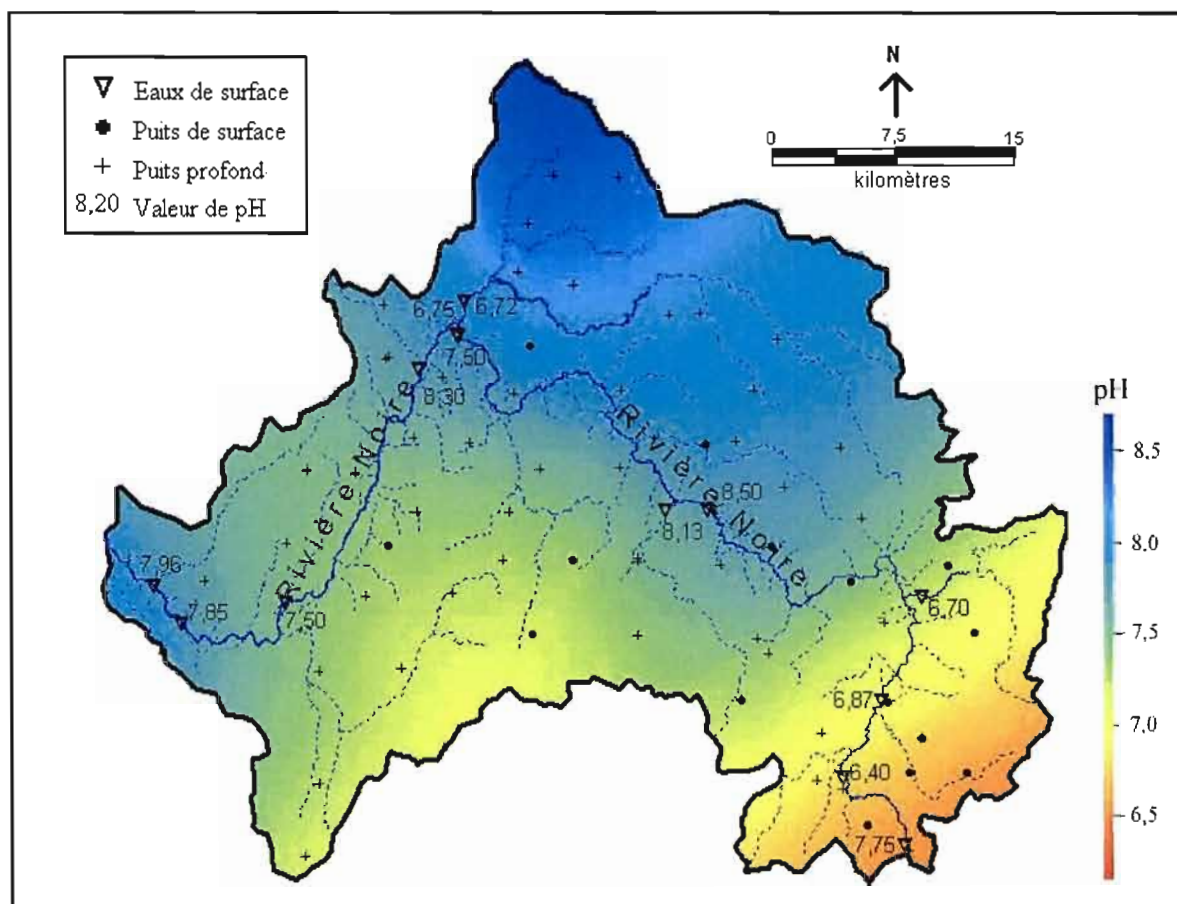


Figure 4.18 : Valeurs de pH de l'eau réparties sur le bassin de la rivière Noire.

Tableau 4.9 : Valeurs de conductivité mesurées aux stations d'échantillonnage

Type de stations	Nb stations	Gamme de valeurs de conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Moyenne ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
Eau de surface	13	63 – 788	282
Puits de surface	16	50 – 937	409
Puits profond	55	41 – 1588	605

La figure 4.19 montre la répartition géographique des mesures de conductivités électriques relevées sur le bassin de la rivière Noire aux puits (de surface et profonds). Les conductivités électriques obtenues pour les cours d'eau ont été ajoutées à des fins de comparaison.

Les conductivités électriques les plus faibles se situent dans le secteur sud-est du bassin (dans la zone amont). De façon générale, la conductivité électrique de l'eau de surface augmente de l'amont vers l'aval. Cette tendance de l'eau de surface concorde bien avec celle de l'eau souterraine qui indique un accroissement des conductivités vers le nord-ouest du bassin.

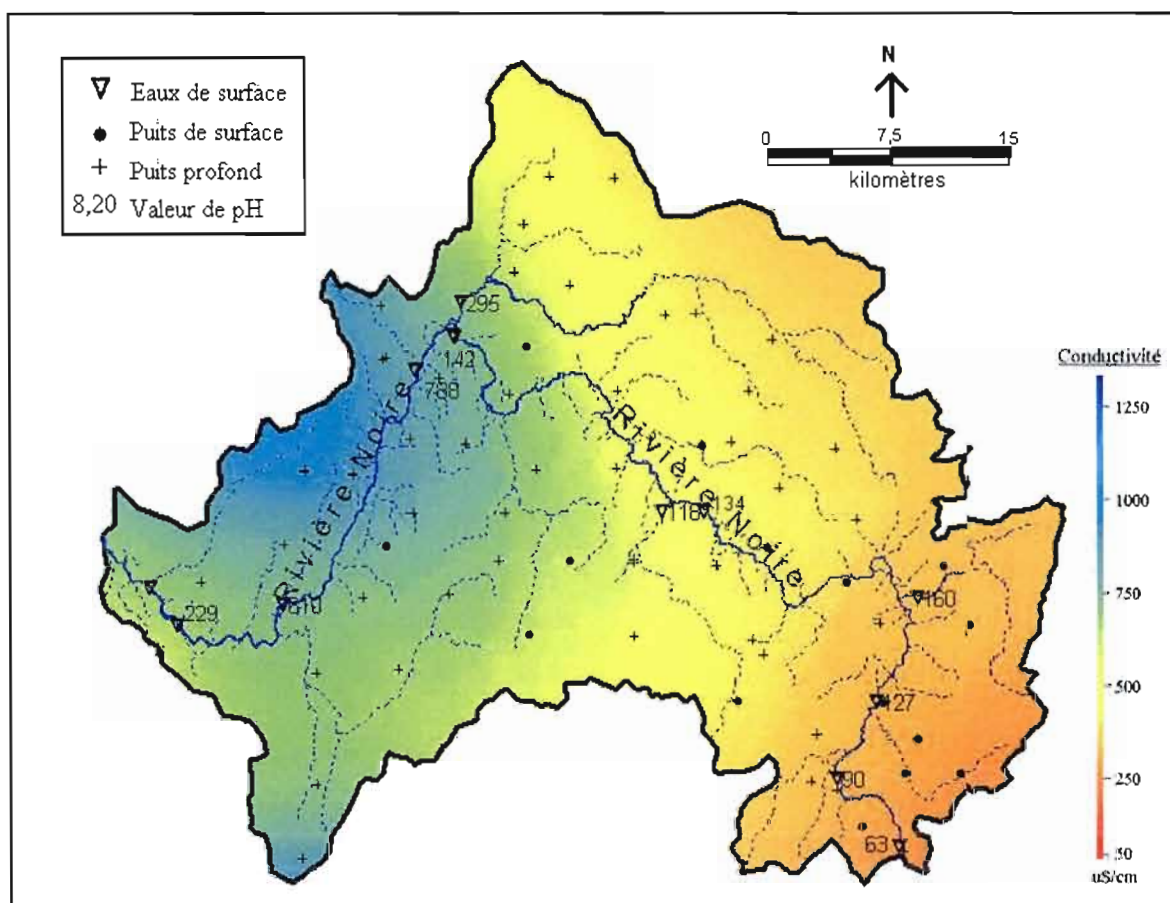


Figure 4.19. : Valeurs de conductivité de l'eau sur le bassin de la rivière Noire.

Les données de pH et de conductivités mesurées sur le bassin de la rivière Noire montrent que le secteur sud-est, soit l'amont du bassin, correspond à une zone de recharge de l'aquifère où l'eau souterraine séjourne moins longtemps. En effet, le pH légèrement acide qui y est observé s'approche de celui des précipitations normales (5,0 – 5,5) (MDDEP, 2005b). La conductivité électrique de l'eau souterraine augmente progressivement dans le

sens de l'écoulement souterrain, indiquant qu'une minéralisation s'accomplit dans cette direction.

4.3 Résultats des ions majeurs

Les analyses d'eau effectuées pour les ions majeurs incluent les composés suivants : les cations potassium K^+ , sodium Na^+ , calcium Ca^{2+} , magnésium Mg^{2+} ainsi que les anions chlore Cl^- , sulfate SO_4^{2-} , bicarbonate HCO_3^{2-} . Les concentrations furent compilées et la balance ionique calculée pour chacune des stations.

Des 41 stations échantillonnées pour les ions majeurs, 14 balances ioniques n'étaient pas valables puisque la balance n'était pas neutre. Selon Freeze et Cherry (1979), une balance ionique de $\pm 5 \%$ est acceptable. Dans cette étude, les balances ioniques présentant une marge d'erreur inférieure à 8 % furent considérées pour l'analyse des résultats inorganiques, tel que réalisé par Cloutier et al. (2001). Les diagrammes de Piper furent utilisés pour qualifier et comparer les échantillons d'eau.

En premier lieu, les échantillons d'eau furent regroupés selon leur origine : eaux de surface, puits de surface et puits profonds. La figure 4.20 montre le diagramme Piper résultant.

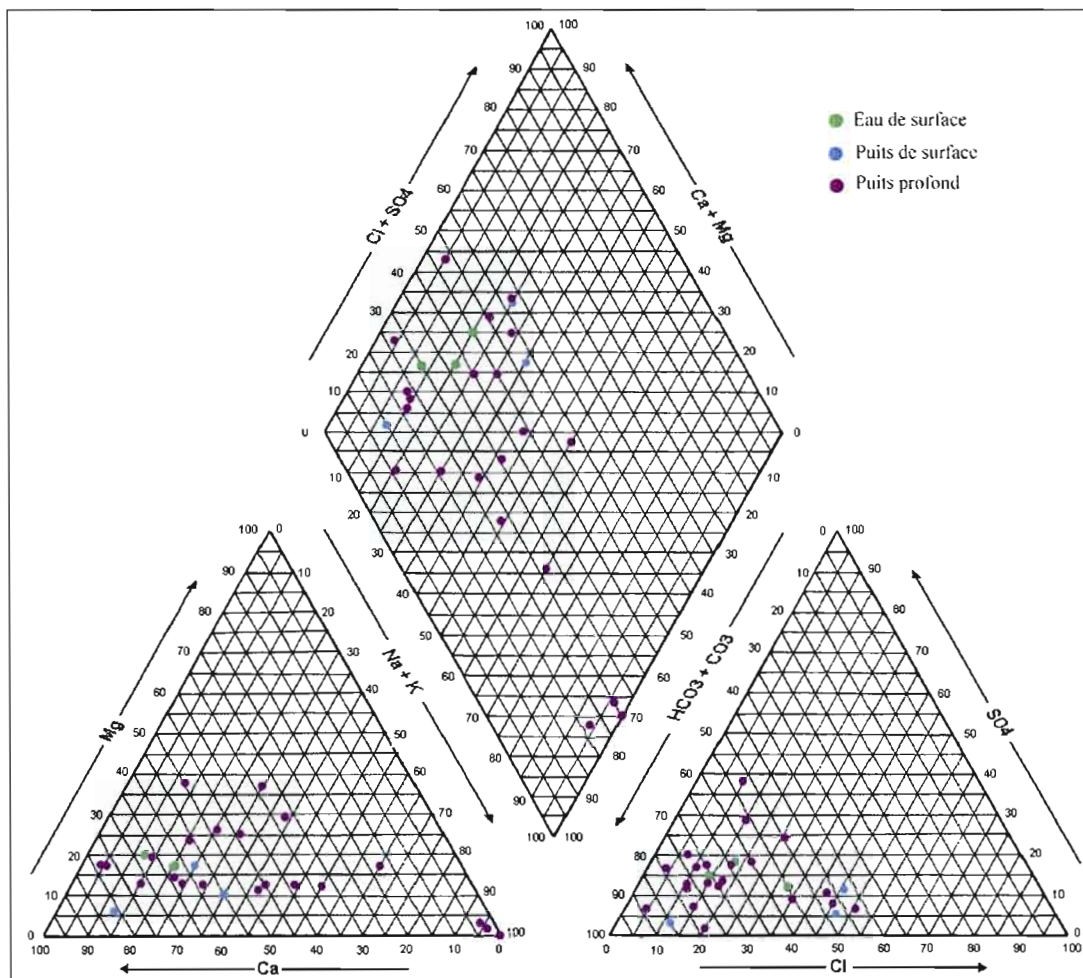


Figure 4.20 : Diagramme de Piper regroupant les échantillons selon leur origine.

La figure 4.20 montre que l'eau de surface provenant des rivières principales drainant le bassin de la rivière Noire et l'eau des puits de surface sont de type bicarbonatée magnésienne. La majorité des échantillons provenant des puits profonds ont une eau de type bicarbonatée calcique magnésienne, alors que trois seulement sont davantage de type bicarbonatée sodique (classification DNEMT, 1996). Ces résultats concordent avec ceux de Paré (1978) qui ne précisait toutefois pas si ces échantillons provenaient de puits profonds ou de surface.

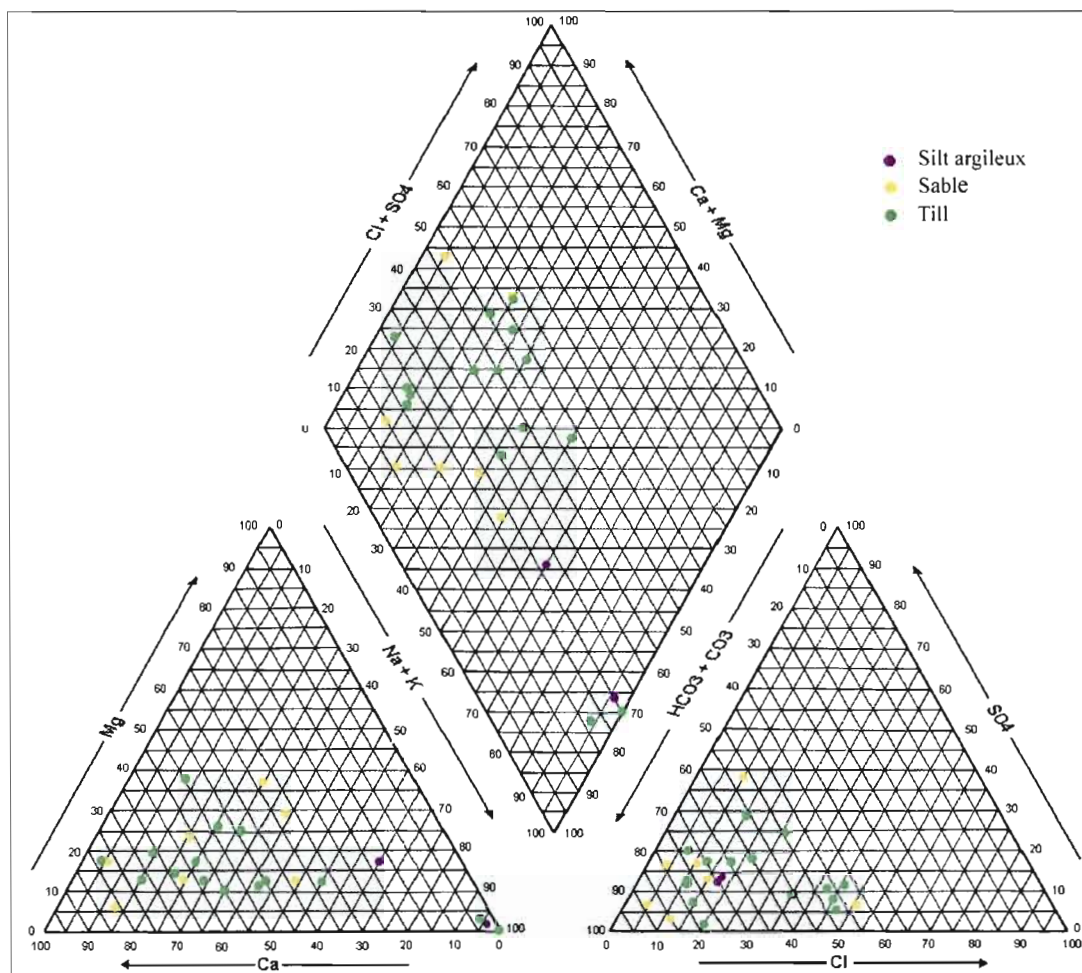


Figure 4.21 : Diagramme de Piper regroupant les échantillons selon les dépôts de surface présents au site de prélèvement.

La figure 4.21 ne montre aucune corrélation entre les types d'eau et la nature des dépôts de surface. Ces résultats illustrent que la signature géochimique de l'eau souterraine n'est pas marquée par la nature des dépôts de surface traversés au moment de la recharge. Les types d'eau provenant des échantillons ont été répartis selon leur localisation sur le bassin à la figure 4.22.

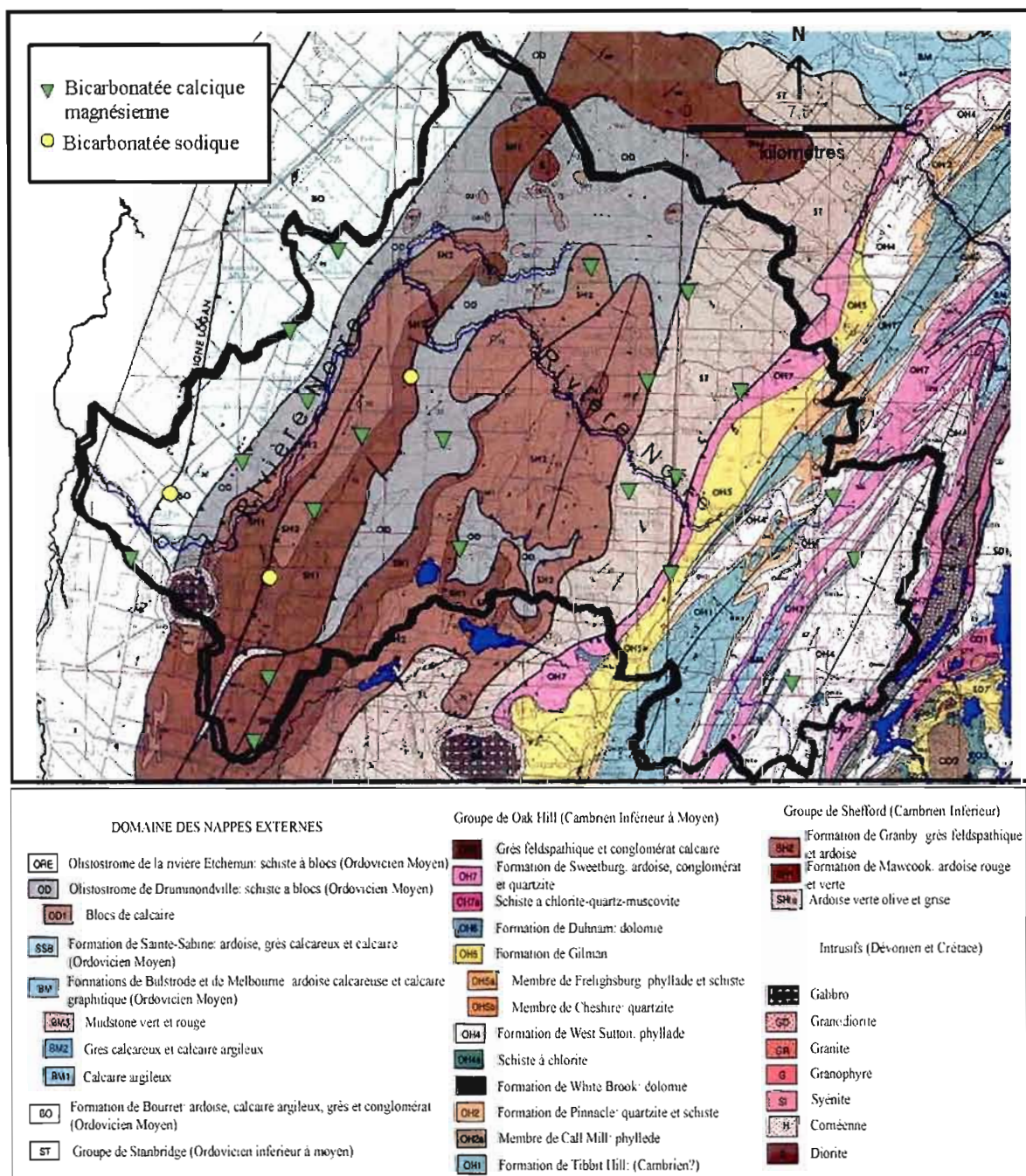


Figure 4.22 : Répartition des types d'eau observées sur le bassin.

Les trois échantillons d'eau appartenant au type bicarbonatée sodique se trouvent à l'aval du bassin. Néanmoins, aucune corrélation d'évolution géochimique spatiale de l'eau

souterraine ne peut être établie à partir de la figure 4.20. Des échantillons d'eau bicarbonaté calcique magnésienne sont retrouvés sur la majorité de la superficie du bassin versant, peu importe la nature du roc en place, ou le cheminement parcouru entre la recharge et le point d'échantillonnage. La répartition des échantillons d'eau bicarbonatée sodique ne permet pas non plus d'établir une corrélation entre les unités de roc et l'évolution spatiale des échantillons puisqu'ils sont localisés de part et d'autre de la rivière Noire, de même qu'entourés d'échantillons bicarbonaté calcique magnésienne. Néanmoins, les échantillons de type bicarbonatée sodique se trouvent dans la portion du bassin où les unités de roc sont recouvertes de dépôts meubles marins. Ces dépôts pourraient avoir retenu du sodium, et influencer ainsi les types d'eau par la recharge venant de infiltration du secteur.

Finalement, aucune tendance de l'écoulement de l'eau souterraine n'a pu être déduite à partir des résultats des ions majeurs. L'aquifère du bassin de la rivière Noire étant libre, il est probable que les processus de mélange intervenant au cours de l'infiltration contrôlent la composition de l'eau (Fryar et al., 2001). Les réactions chimiques et les mélanges d'eau, combinés à la superficie du bassin à l'étude et à la vaste gamme de paramètres pouvant intervenir au niveau de la composition géochimique des échantillons, rendent très complexe l'analyse des résultats.

4.4 Résultats des nitrates

Le sommaire des teneurs en nitrates mesurées aux stations d'échantillonnage est présenté au tableau 4.10. Les concentrations en nitrates les plus élevées proviennent des puits de surface. Toutefois, la concentration maximale de 32,52 mg N-NO₃/l est obtenue dans un puits profond (10,7 m). Les moyennes des valeurs sont biaisées par quelques concentrations très élevées dépassant la norme pour l'eau potable.

Tableau 4.10 : Valeurs de nitrates mesurées aux stations d'échantillonnage.

Type de stations	Nombre de stations	Gamme de teneurs en nitrates (mg N-NO ₃ /l)	Moyenne (mg N-NO ₃ /l)
Eau de surface	5	0,05 – 1,50	0,49
Puits de surface	12	0,03 – 15,08	2,98
Puits profond	50	0,00 – 32,52	1,41

Sur le total des 62 puits analysés, 43 puits (69 %) présentent des concentrations inférieures à 1,0 mg N-NO₃/l, seuil indicateur d'une influence anthropique. Quinze puits (24 %) comptent entre 1,0 et 5,0 mg N-NO₃/l et un puits (2 %) a une concentration en nitrates entre 5,0 et 10,0 mg N-NO₃/l. Finalement, trois puits (5 %) excèdent la norme pour l'eau potable de 10,0 mg N-NO₃/l. Ces résultats soulignent l'importance de la contamination de l'eau souterraine par les nitrates sur le bassin de la rivière Noire.

La figure 4.23 compare le pourcentage de puits de concentration supérieure à 3,0 mg N-NO₃/l de cette étude avec celui de Bolduc (2004) (zone en aval et agricole sur le bassin de la rivière Noire) et celui du MENV (2004) sur sept bassins versants en surplus de fumier. (Le seuil de 3,0 mg N-NO₃/l a été retenu à des fins de comparaison car c'est celui utilisé dans l'étude du MENV).

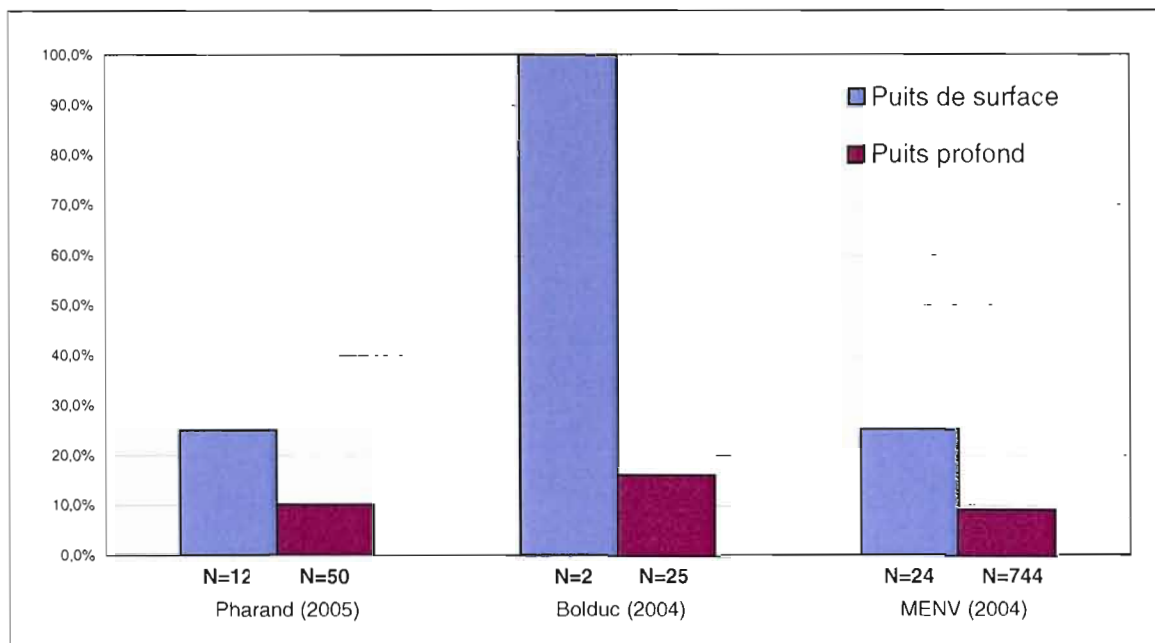


Figure 4.23 : Puits présentant une concentration en nitrates supérieure à 3,0 mg N-NO₃/l selon différentes études.

Ce graphique montre que le pourcentage de puits profonds excédant 3,0 mg N-NO₃/l est sensiblement le même aux échelles locale et régionale sur le bassin de la rivière Noire (environ 10 %). Le pourcentage de puits de surface excédant cette concentration semble supérieur à l'échelle locale, mais ceci est dû au petit nombre de puits de surface échantillonnés par Bolduc (2004). La comparaison avec les résultats du MENV (2004) montre que le pourcentage de puits de surface et profond excédant 3,0 mg N-NO₃/l est sensiblement le même dans différents bassins versants agricoles du Québec.

La figure 4.24 représente la distribution spatiale des teneurs en nitrates provenant des puits (de surface et profonds). Les teneurs en nitrates mesurées dans l'eau de surface sont illustrées pour fins de comparaison. Aucune tendance spatiale de contamination ne peut être mise en évidence sur le bassin. Pour l'eau de surface, les concentrations en nitrates augmentent de l'amont vers l'aval, sans doute en raison d'apports en ruissellement chargés en nitrates plus importants vers l'aval du bassin où l'agriculture est plus intense.

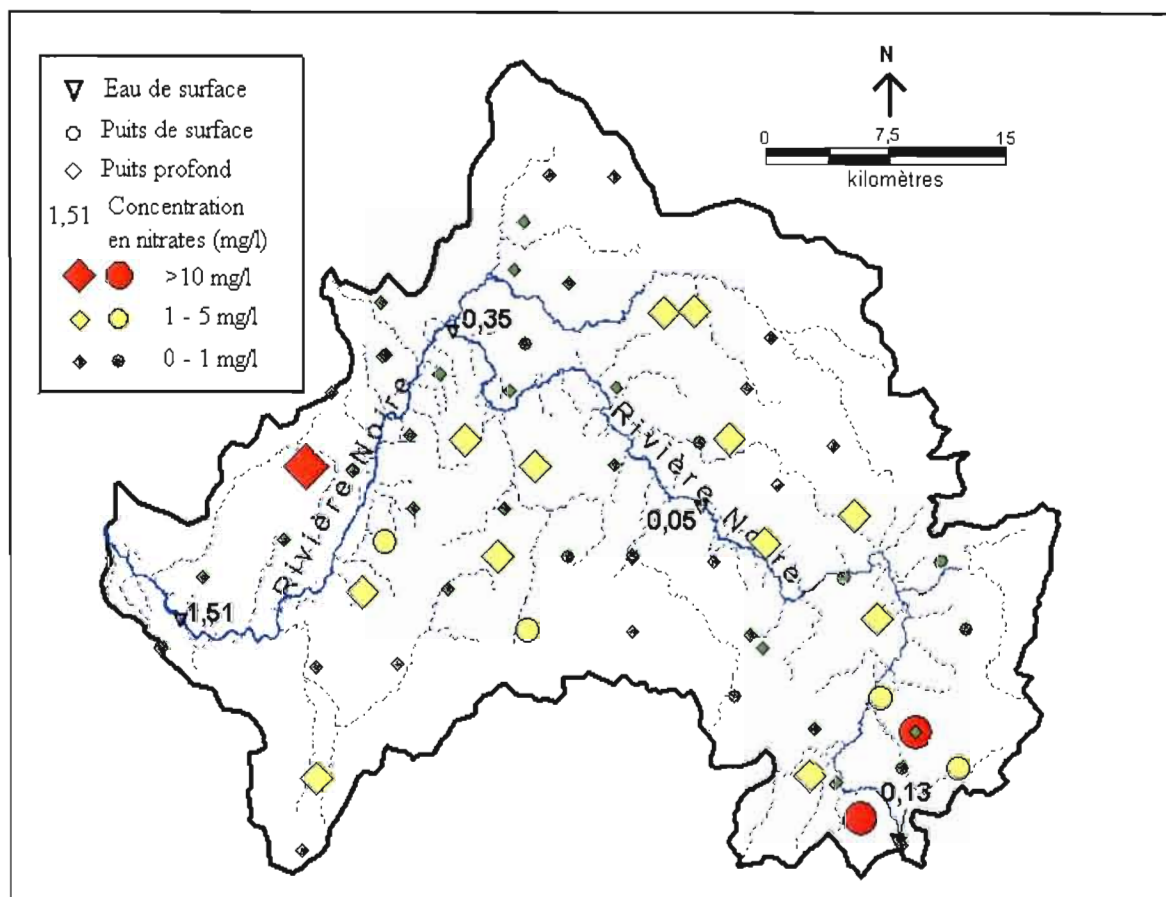


Figure 4.24 : Teneurs en nitrates de l'eau sur le bassin de la rivière Noire.

Pour les puits de profondeur connue, une relation est observée entre la concentration en nitrates et la profondeur du puits (figure 4.25). La concentration en nitrates diminue généralement avec la profondeur des prélèvements, à l'exception d'un puits profond où une concentration élevée a été observée. Une tendance similaire a été observée par Bolduc et al. (2006) sur un secteur situé à l'aval sur le bassin versant de la rivière Noire.

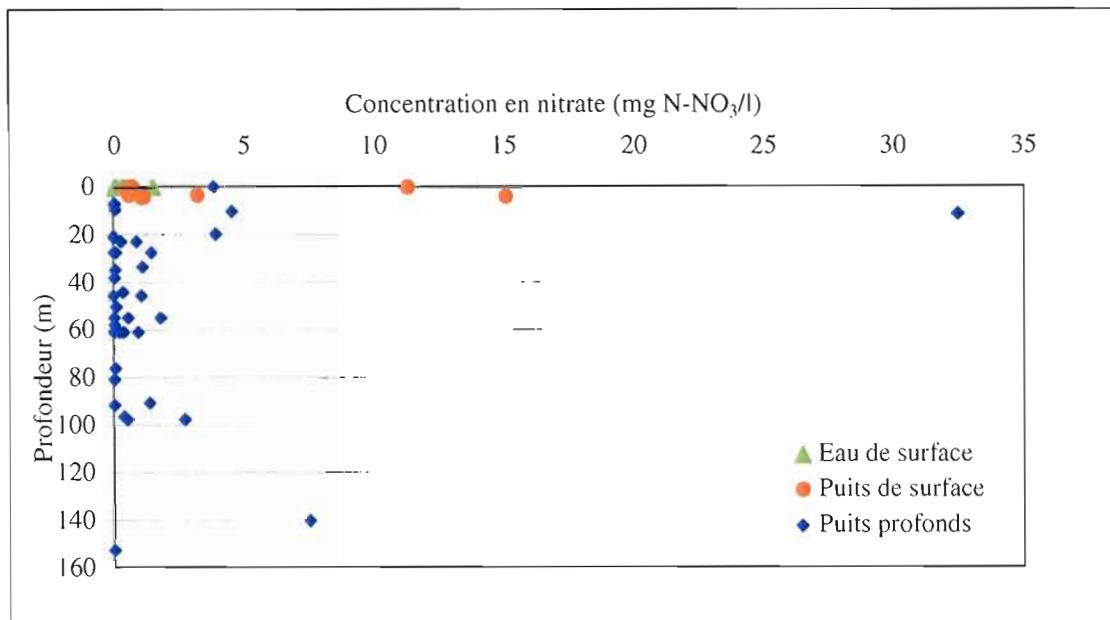


Figure 4.25 : Relation entre la profondeur et la teneur en nitrates des échantillons.

Les stations où des concentrations en nitrates élevées ont été mesurées dans l'eau souterraine correspondent apparemment à des cas de contamination localisée. La source de cette contamination pourrait être ponctuelle (amas de fumier, système d'épuration des eaux usées mal conçu) ou diffuse (épandage excessif de fertilisants organiques ou chimiques). Pour le confirmer, il serait nécessaire d'analyser les isotopes de l'azote (Clark et Fritz, 1997). Il est possible, mais non vérifié dans cette étude, que la dénitrification soit responsable de l'absence de concentrations plus élevées sur l'ensemble du bassin versant (Koh et al, 2005). Il est plutôt probable que l'absence d'une contamination généralisée soit due au fait que l'agriculture n'est intensive que dans la portion aval du bassin. Les résultats peuvent être interprétés, comme l'ont fait Bolduc et al. (2006), par le rôle important des écoulements souterrains proches de la surface (système d'écoulement local – Toth, 1963) dans le transport rapide des nitrates entre coteaux et les cours d'eau, évitant ainsi la contamination des couches sous-jacentes de l'aquifère où l'eau souterraine est prélevée par les puits profonds.

4.5 Qualité générale de l'eau souterraine

Les ions suivants ont aussi été analysés : aluminium Al^+ , manganèse Mn^{2+} , fer Fe^{3+} , silice Si^{2+} , fluor F^- , nitrites NO_2^- , brome Br^- et phosphates PO_4^{3-} . Les concentrations moyennes provenant des puits ayant présenté une balance ionique égale ou inférieure à 8 %, ont été comparées aux normes admises sur la qualité de l'eau potable (MDDEP, 2005)(tableau 4.11)

Tableau 4.11 : Qualité générale de l'eau souterraine.

Analyse	Gamme de valeurs (Puits affichant des dépassements)	Norme du Règlement sur la qualité de l'eau potable (MDDEP)
Paramètre physico-chimique		
pH	6,15 - 9,11 (5)	6,5 – 8,5
Conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	41 – 1588 (2)	≤ 1500
Cations (mg/L)		
Aluminium	0,0 - 0,096	-
Calcium	0,07 – 180,0 (0)	< 250
Fer	0,001 – 5,69 (5)	< 0,3
Potassium	0,34 – 13,3	-
Magnésium	0,006 – 37,7	-
Manganèse	0,0006 – 6,30 (16)	0,050
Sodium	1,1 – 193 (0)	200
Silice	0,59 - 8,81	-
Anions (mg/L)		
Fluor	0,0 - 0,9	-
Chlore	1,47 - 235,7 (0)	250
Nitrites	0 - < 0,1 (0)	1
Bromures	< 0,05	-
Nitrates	0,02 – 32,5 (3)	10
Phosphates	< 0,2	-
Sulfates	4,7 - 146,5	-
CID	54,0	-

La norme pour le pH est dépassée à cinq puits et celle pour la conductivité électrique à deux puits. Pour les cations et les anions, certains ions n'ont pas de norme à ce jour. Les normes du RQEP sont dépassées cinq fois pour le fer et 16 fois pour le manganèse. Aucun bromure et phosphate n'ont été détectés dans les échantillons.

4.6 Résultats des isotopes stables ^{18}O et ^2H

Le sommaire des contenus en isotopes stables ^2H est présenté au tableau 4.12. Les teneurs les plus appauvries se retrouvent dans les puits de surface. Les puits plus profonds montrent des contenus en ^2H qui se rapprochent du contenu moyen des précipitations mesuré à la station GNIP d'Ottawa pour l'année 2001 (AIEA et ISOHIS, 2003). L'eau de surface présente une gamme de contenus en ^2H plus restreinte et une signature isotopique moyenne plus appauvrie que l'eau souterraine profonde, mais plus enrichie que l'eau souterraine provenant des puits de surface.

Tableau 4.12 : Valeurs de ^2H mesurées aux stations d'échantillonnage.

Type de stations	Nb stations	Gamme de teneurs en ^2H (‰)	Moyenne (‰)
Eau de surface	4	- 85,8 – -82,5	-83,8
Puits de surface	7	- 95,1 – -84,1	-89,6
Puits profond	57	- 95,1 – -71,8	-79,7
Précipitations station GNIP d'Ottawa (2001)	1	-150,4 – -32,1	-72,93

Les teneurs en ^2H les plus appauvries de l'eau de surface se situent en amont du bassin, soit en altitude plus élevée. La pointe au sud-ouest du bassin se rapproche davantage de la moyenne des précipitations annuelles que le reste du bassin (figure 4.26) (AIEA et ISOHIS, 2003). Comme pour les graphiques précédents, seules les données provenant des puits ont

été utilisées pour tracer la figure 4.26. Les teneurs obtenues pour l'eau de surface sont illustrées pour fins de comparaison. Les données complètes sont répertoriées à l'annexe 2.

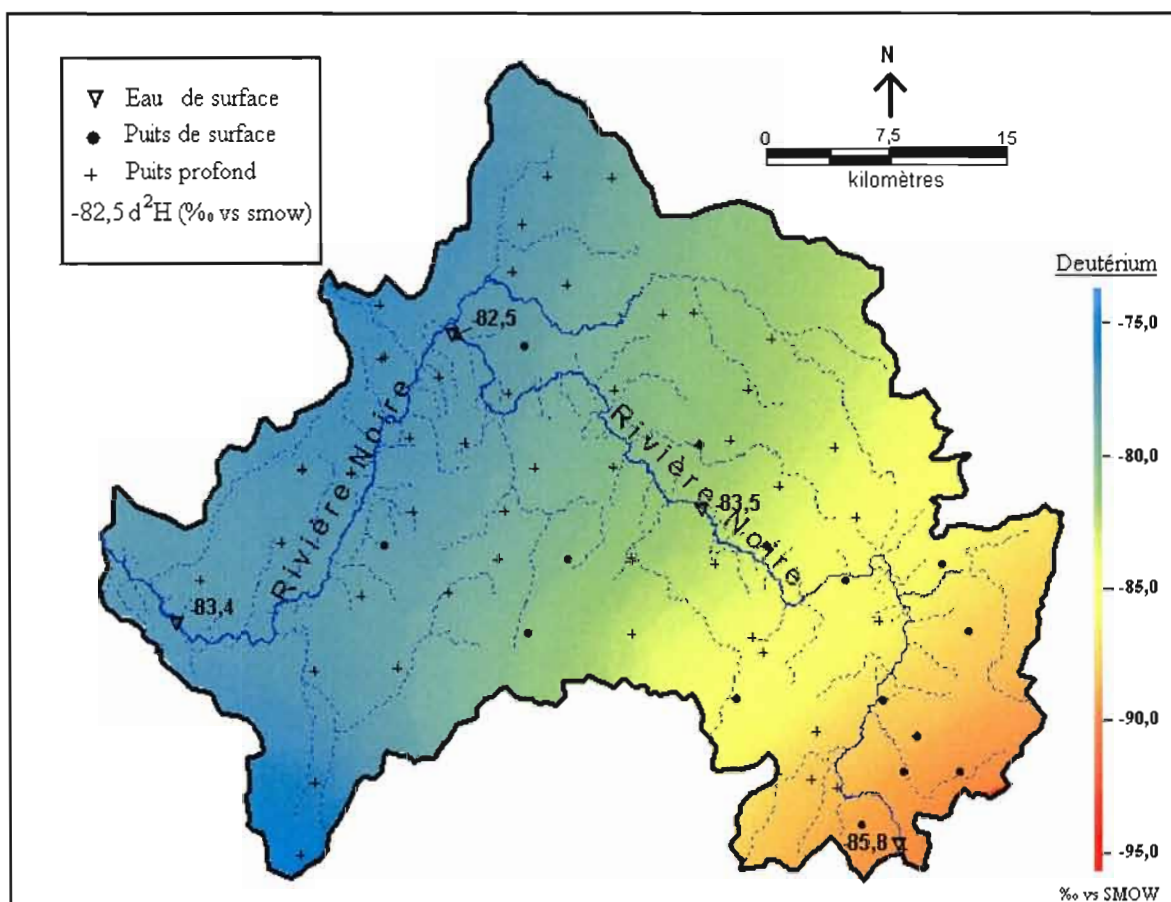


Figure 4.26 : Teneur en 2H de l'eau sur le bassin de la rivière Noire.

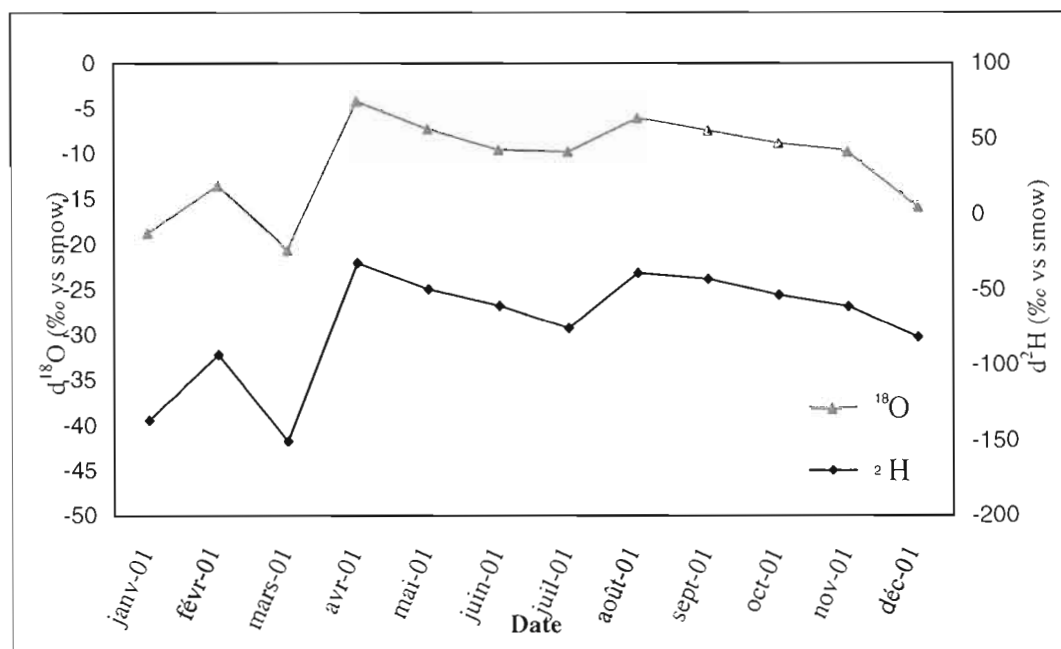


Figure 4.27 : Signatures isotopiques des précipitations à la station d'Ottawa (1986-2001), Environnement Canada.

Le sommaire des contenus en isotopes stables ^{18}O est présenté au tableau 4.13. Encore une fois, les teneurs les plus appauvries se retrouvent dans les puits de surface. Les puits plus profonds montrent des contenus en ^{18}O qui se rapprochent du contenu moyen des précipitations mesuré à la station GNIP d'Ottawa pour l'année 2001 (AIEA et ISOHIS, 2003).

Tableau 4.13 : Valeurs de ^{18}O mesurées aux stations d'échantillonnage.

Type de stations	Nombre de stations	Gamme de teneurs en ^{18}O (‰)	Moyenne (‰)
Eau de surface	4	- 11,82 – -11,34	-11,49
Puits de surface	7	- 13,34 – -11,36	-12,47
Puits profond	57	- 13,32 – -9,90	-11,19
Précipitations station GNIP d'Ottawa (2001)	1	- 20,50 – -4,10	-10,89

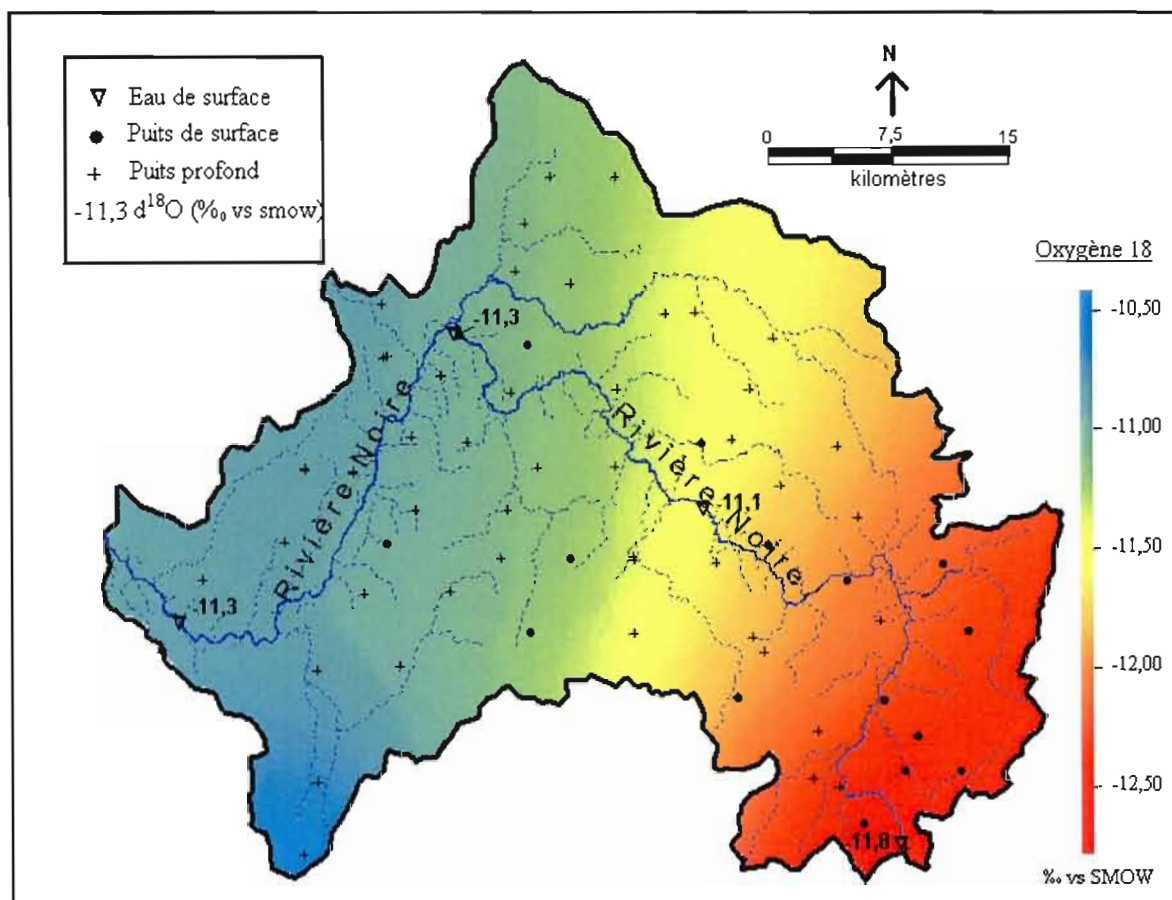


Figure 4.28 : Teneur en ^{18}O de l'eau sur le bassin de la rivière Noire.

À la figure 4.28, seules les données provenant des puits ont été utilisées pour la figure. Les teneurs obtenues pour les cours d'eau et la rivière Noire sont illustrées pour fins de comparaison. Les teneurs en ^{18}O mesurées sur le bassin de la rivière Noire concordent avec celles du ^2H . Les teneurs les plus appauvries sont à l'amont du bassin et dans les puits de surface (tableau 4.13). L'eau de surface à l'amont présente un appauvrissement plus important que sur le reste du bassin et la pointe du sud-ouest du bassin est plus enrichie que le reste du bassin.

La figure 4.29 présente les contenus isotopiques de l'eau souterraine et de surface pour le bassin de la rivière Noire, par rapport à la courbe des eaux météoritiques mondiales SMOW. Les eaux du bassin suivent bien la tendance du SMOW à l'exception d'un puits profond.

Dans l'ensemble, l'eau échantillonnée à partir des puits profonds est plus enrichie en isotopes de l'eau tandis que l'eau provenant de la zone amont est généralement appauvrie (ellipse sur la figure 4.29).

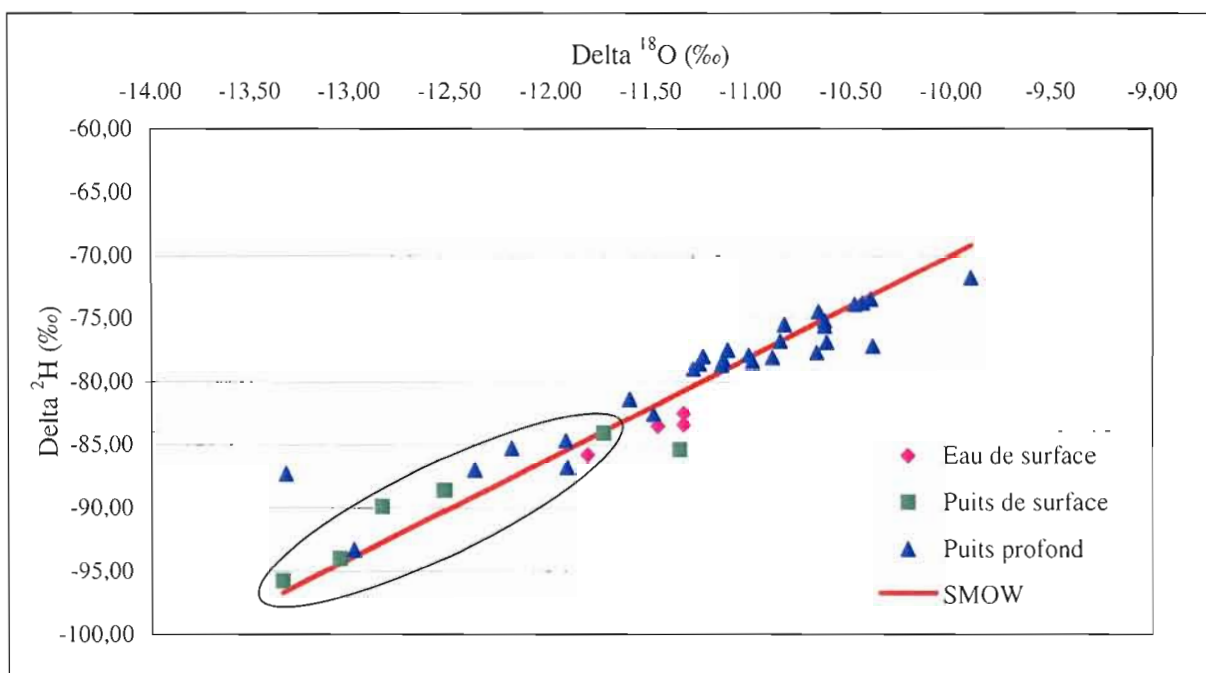


Figure 4.29 : Rapports isotopiques de l'eau du bassin de la rivière Noire par rapport au SMOW.

La figure 4.30 illustre que le contenu en deutérium augmente dans l'ensemble en même temps que la conductivité électrique de l'eau souterraine. Ces deux indicateurs évoluent donc de manière similaire sur le bassin, dans le même sens que le temps de séjour de l'eau souterraine.

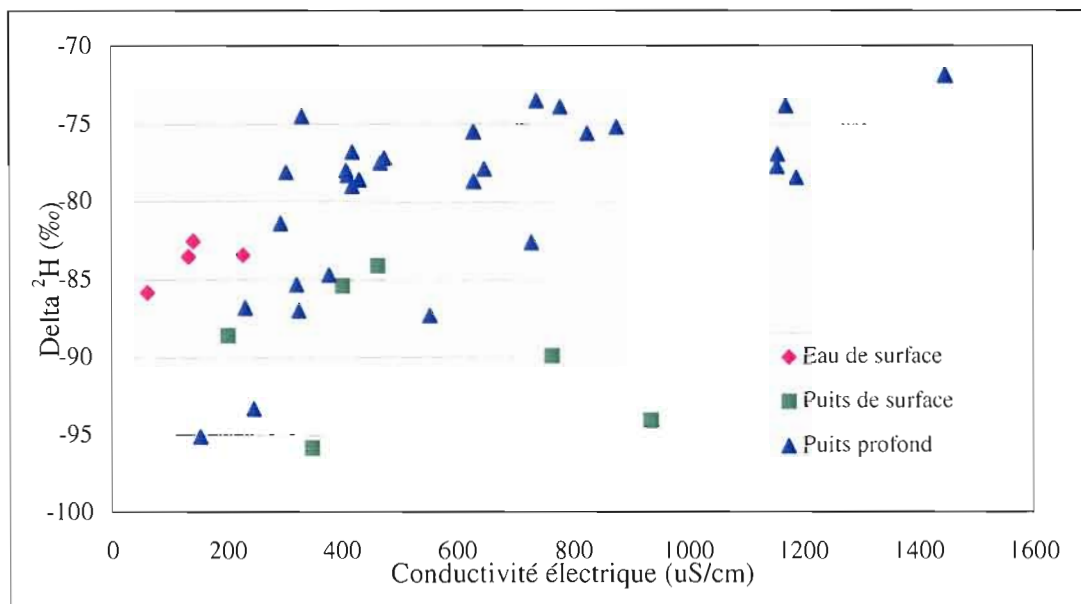


Figure 4.30 : Relation entre ^2H et la conductivité électrique dans l'eau souterraine

Le secteur amont du bassin de la rivière Noire est plus appauvri en isotopes stables que le reste du bassin. Ces données témoignent que l'eau a subi l'influence de la recharge printanière récemment infiltrée, plus appauvrie en isotopes stables (Soulsby et al., 1998). Les précipitations continentales hivernales sont plus appauvries en raison des températures froides (Rodgers et al., 2005). Les teneurs en ^{18}O et en ^2H sont de moins en moins appauvries vers le nord-est et représentent la teneur moyenne des précipitations annuelles (Clark et Fritz, 1997). Le mélange de la recharge avec les masses d'eau en place tend à effacer les variations saisonnières et particulièrement dans les aquifères profonds ayant un réseau de fractures bien connecté (Gibson et al, 2005). Les faibles variations spatiales des contenus isotopiques du centre du bassin indiquent probablement un long temps de résidence pour ces eaux (Jorgensen et Banoeng-Yakubo, 2001).

Les signatures isotopiques obtenues dans la rivière Noire reflètent le drainage des eaux résultantes de la fonte des neiges, mêlées aux précipitations récentes ainsi qu'une éventuelle contribution de l'eau souterraine superficielle. Ainsi, la rivière draine l'eau de la fonte printanière appauvrie en isotopes stables, mais présente une valeur plus enrichie en aval

puisque la nappe fournit un écoulement de base ayant un contenu plus enrichi en isotopes stables. Si c'était la rivière qui alimentait l'aquifère, des contenus isotopiques appauvris auraient été observés dans les puits voisins de la rivière (Salem, 2004).

4.7 Discussion

L'information fournie par les indicateurs géochimiques est généralement reconnue pour tracer les écoulements souterrains (Walker et al., 2003). Les résultats géochimiques obtenus sur le bassin de la rivière Noire montrent un lien entre les paramètres de pH, la conductivité électrique et les signatures isotopiques du ^{18}O et du ^2H . Le secteur amont, soit le sud-est du bassin, correspond à une zone de pH plus faible, de conductivité électrique plus faible et appauvrie en isotopes stables, délimitant ainsi une zone où la recharge circule de manière très rapide, probablement dans une portion superficielle de l'aquifère. La direction d'écoulement régionale a pu être estimée à l'aide de ces paramètres. Dans le contexte étudié, l'information obtenue a permis d'identifier les directions régionales d'écoulement, mais la variabilité spatiale des résultats ne permet pas d'apporter de précisions sur les directions locales d'écoulement. Dans le cas d'une nappe libre, l'analyse géochimique semble particulièrement utile dans les secteurs où le réseau d'écoulement de sub-surface est prononcé.

La méthode de détermination des directions d'écoulement basée sur les paramètres géochimiques demeure incomplète. En effet, les eaux plus vieilles résultent d'un mélange et d'une suite de réactions chimiques et subissent l'infiltration d'eau plus récente puisque l'aquifère est libre. Ces processus ont pour effet d'affaiblir les signatures distinctives qui sont recherchées. À cet effet, l'utilisation de traceurs absents du milieu naturel présenterait un avantage certain. L'usage de traceurs radioactifs, tels que les CFC ou le ^{14}C ne serait pas utile sur ce bassin puisque l'aquifère est libre et que la recharge a lieu sur la majorité de la superficie.

Aussi, bien que la contamination ne soit pas généralisée sur l'ensemble du bassin, 31 % des puits échantillonnés ont présenté des concentrations en nitrates supérieures au seuil de 1 mg N-NO₃/l généralement reconnu pour refléter une influence anthropique.

4.8 Conclusion

En conclusion, l'utilisation de données de pH, de conductivité électrique et des isotopes stables a permis d'évaluer les directions d'écoulement souterrain régional de l'aquifère. Il n'est pas certain qu'un plus grand nombre d'échantillons sur un bassin de cette superficie permettrait de reconnaître des directions d'écoulement locales, car l'aquifère est de nature libre. Un suivi géochimique dans le temps, dans des forages de profondeur connus, positionnés en grappe et dont les niveaux sont mesurés automatiquement, fournirait les informations requises pour une analyse plus complète des directions d'écoulement locales. La géochimie de l'eau souterraine a permis de confirmer que le secteur amont correspond à un réseau d'écoulement souterrain de sub-surface plus développé en raison de la géologie du socle plus tectonisée et de la topographie plus marquée. Ces informations combinés à la discontinuité des dépôts meubles laissent présager que le secteur amont du bassin correspond à une zone de recharge plus importante que le reste du bassin bien que de l'infiltration a lieu sur l'ensemble du bassin.

CHAPITRE V

MODÉLISATION ET SIMULATION HYDROGÉOLOGIQUE

La modélisation hydrogéologique a été choisie pour étudier l'écoulement sur le bassin de la rivière Noire. L'utilisation d'un modèle numérique fut préconisée étant donné la complexité de reproduire les interactions naturelles intercedant dans la circulation d'eau de surface et souterraine à l'échelle d'un bassin versant de 1579 km². Ce chapitre présente les résultats obtenus à l'aide du modèle.

5.1 Modèle conceptuel

La compréhension du fonctionnement hydrogéologique de l'aquifère du bassin de la rivière Noire acquise dans les chapitres précédents peut maintenant être intégrée dans un modèle conceptuel.

Les simulations ont été basées sur un régime permanent puisque les données piézométriques disponibles ont été relevées sur plusieurs années. Le modèle est tri-dimensionnel : la surface du bassin a été divisée en 120 cellules longitudinalement par 100 cellules latitudinalement. L'épaisseur du roc aquifère a été divisée en cinq couches de 5, 10, 20, 25 et 40 m d'épaisseur. La conceptualisation du modèle d'écoulement régional a été difficile car la topographie aux abords des rivières était mal définie en raison des dénivellations importantes dans un tracé étroit. Puisque les niveaux d'eau de la rivière devaient être réalistes, l'altitude de plusieurs cellules a dû être corrigée manuellement.

Dans le modèle, la rivière Noire a été définie comme une limite mixte, à l'aide de l'option « River ». Bien que des liens hydrauliques avec un aquifère de plus grande dimension aient été reconnus à quelques endroits sur le bassin, les limites de l'aquifère ont été posées aux limites topographiques du bassin versant de surface. Toutes les limites du modèle sont donc des flux nuls. La nature des dépôts meubles n'a été prise en compte que pour la répartition de la recharge sur l'ensemble du bassin.

Différents scénarios de recharge ont été testés et calés pour les scénarios de modélisation. La recharge, précédemment évaluée à l'aide des débits de base de la rivière Noire par Gauthier (2003) (section 3.6), a d'abord été considérée uniforme sur l'ensemble du bassin, sans égard à la présence et à la nature des dépôts de surface. Le tableau 5.14 présente les valeurs de recharge utilisées pour la modélisation du bassin.

Tableau 5.14: Valeur de recharge utilisée pour les scénarios.

Station	Résultat	Recharge (mm/an)/km
		Calculée selon les débits de base (Gauthier, 2003)
030304	minimum	110,5
	maximum	368,4
	moyen	223,8

Pour toutes les simulations, la conductivité hydraulique verticale du roc est supposée 10 fois inférieure à la conductivité horizontale pour chacune des couches. Les conductivités hydrauliques testées diminuent à partir de la surface, tel que trouvé par Bolduc (2004) et Djineng Njomo (2002). Les charges initiales utilisées pour le modèle correspondent à 0,8 m sous la topographie afin que toutes les cellules du modèle incluent un volume d'eau initial. De plus, l'étude hydrogéologique du bassin a montré que les charges observées de la nappe suivaient de près la topographie. Les conductivités hydrauliques initialement utilisées sont issues des résultats de simulation de Bolduc (2004).

5.1 Résultats des simulations

Le modèle ayant été complété, différents scénarios ont été testés sur le bassin. À partir du modèle réalisé, des simulations ont été conduites en calant les conductivités hydrauliques des cinq couches du modèle de même que la recharge et sa répartition. Dans tous les cas, le calage a été réalisé manuellement par essai-erreur, de manière à reproduire au mieux les charges mesurées sur le terrain en mai 2003 et celles issues du SIH. Les résultats du calage des paramètres sont présentés sous forme de deux scénarios différents, qui mènent tous les deux vers une meilleure représentation de la réalité hydrogéologique du bassin.

5.1.1 Scénario 1

Pour le premier scénario, la recharge a été supposée uniforme sur l'ensemble du bassin et fixée à la valeur moyenne annuelle calculée à l'aide des débits de base, soit 223,8 mm/an. Seules les conductivités hydrauliques des cinq couches ont fait l'objet d'un calage. Celles-ci ne présentent aucune variabilité latérale, seulement verticale. Le tableau 5.15 présentent les valeurs des paramètres ayant permis d'obtenir le meilleur calage des charges.

Tableau 5.15: Conductivités hydrauliques du roc aquifère calées pour le scénario.

Couche	Conductivité hydraulique horizontale (m/jour)
1	12
2	4
3	0,8
4	0,1
5	0,01

Les figures suivantes présentent les résultats du meilleur calage pour le premier scénario. La figure 5.31 indique la piézométrie simulée par le modèle. Les points visibles en rouge sur cette même figure localisent les cotes piézométriques mesurées sur le terrain en mai 2003.

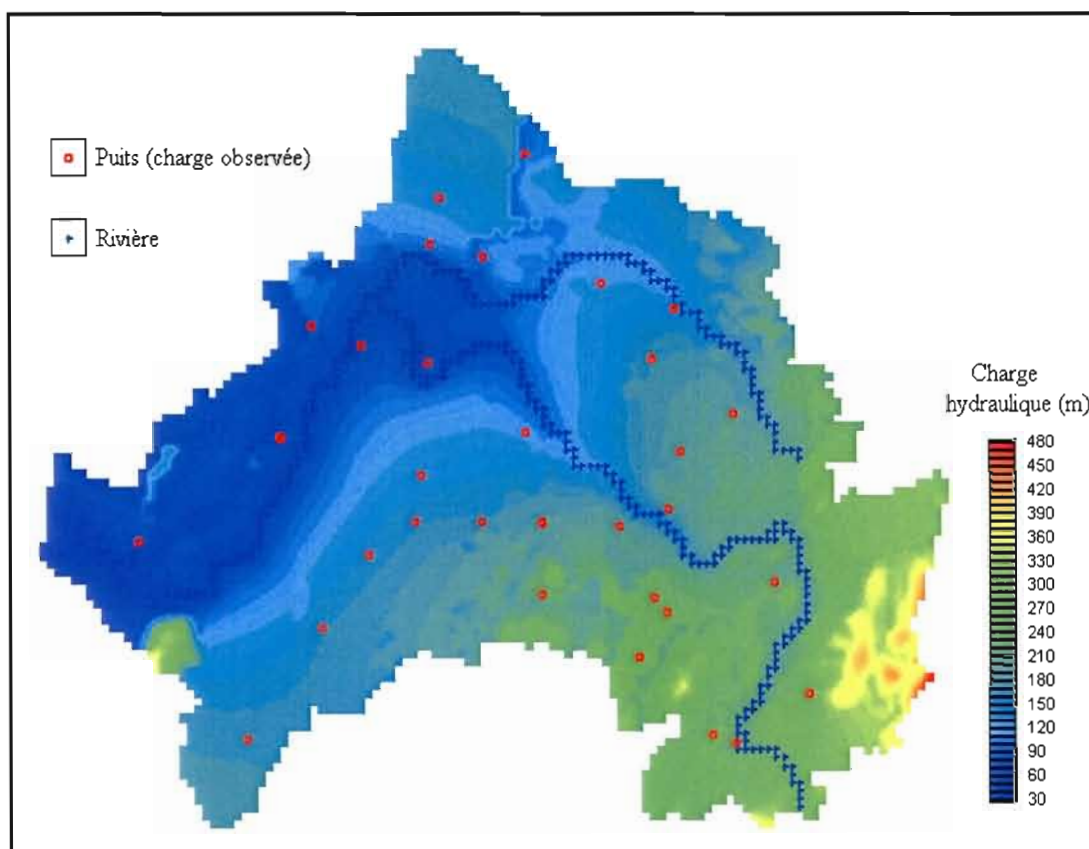


Figure 5.31 : Carte piézométrique simulée – scénario I.

La comparaison des charges mesurées et simulées aux stations visitées en mai 2003 est représentée à la figure 5.32. Les charges simulées ont également été comparées aux charges des données du SIH (figure 5.33). La qualité du calage peut être observée sur ce type de diagramme. En effet, plus les cotes piézométriques suivent la droite d'égalité, plus le modèle et la simulation tendent à bien représenter la réalité piézométrique du bassin.

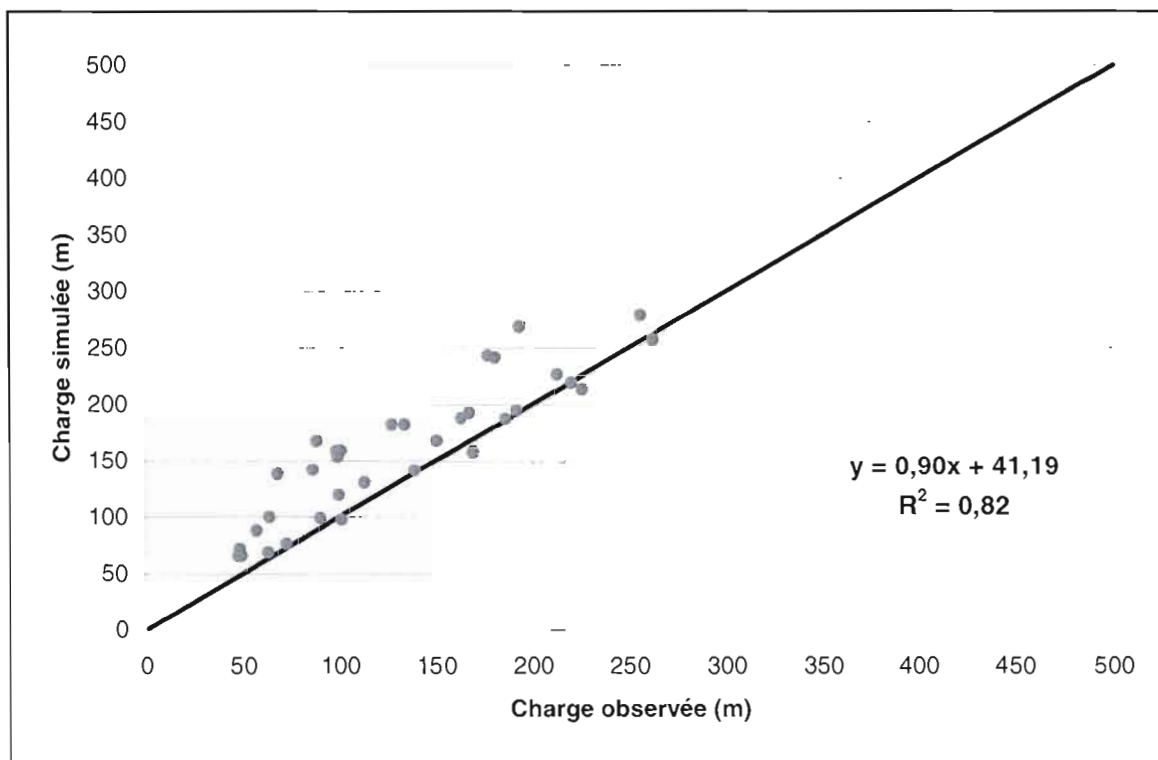


Figure 5.32 : Comparaison des charges observées sur le terrain et des charges simulées avec le scénario 1.

De façon générale, les charges les plus élevées du bassin sont bien représentées par le modèle, à la fois pour les données de mai 2003 et pour celles du SIH. Avec les deux jeux de données, les résultats montrent que la simulation devient moins précise pour les charges moyennes et les plus faibles du bassin. En effet, toutes les charges au-dessus de 200 m sont sur-estimées par cette simulation. Les charges maximales simulées sur le bassin avec ce scénario atteignent 480 m. Les charges mesurées sur le mont Yamaska n'ont pas été incluses dans la comparaison car elles ont été jugées non-représentatives de l'écoulement dans l'aquifère étudié.

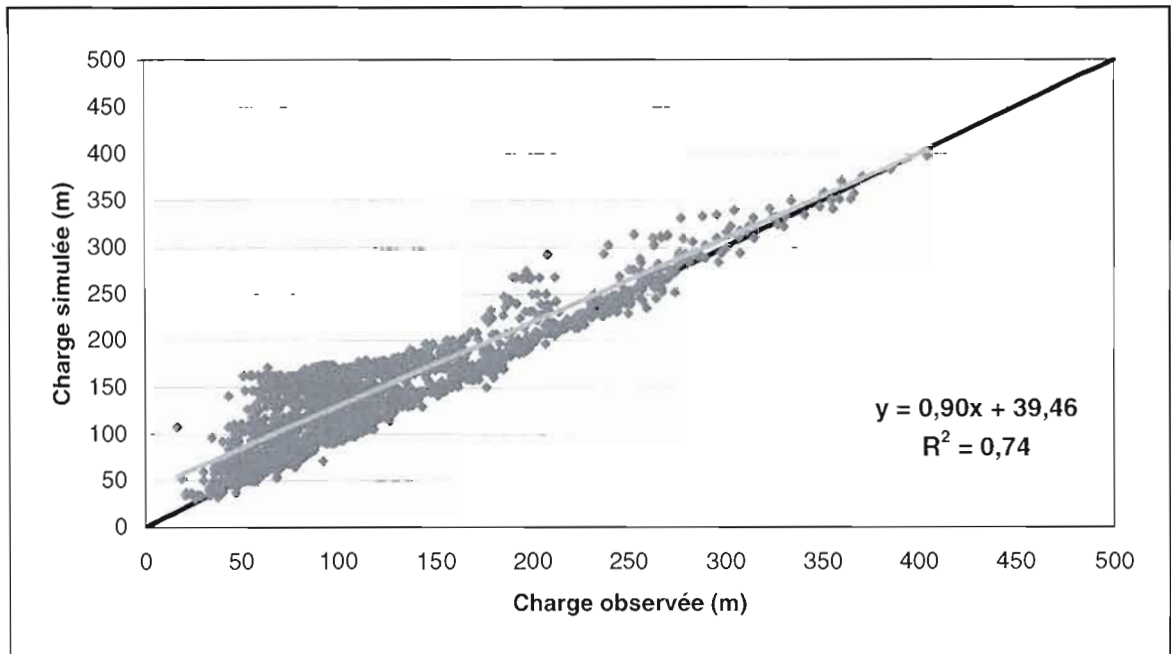


Figure 5.33 : Comparaison des charges observées (données du SIH) et des charges simulées avec le scénario 1.

5.1.2 Scénario 2

Pour le deuxième scénario, le bassin a donc été divisé en trois secteurs : la zone ouest (moins perméable), le centre du bassin et la zone est à l'amont (très perméable) (section 3.6). La division des secteurs a été basée sur la nature des dépôts meubles rencontrés à la surface du bassin. Puisqu'il a été établi, par l'étude de l'hydrogéologie du bassin, que la nature des dépôts meubles n'influait pas les directions d'écoulement, seule la distribution spatiale de la recharge, a été ajustée selon ce critère. La recharge appliquée à chacun des secteurs est respectivement de 150 , 250 et 320 mm/an pour les secteurs aval, centre et amont (figure 3.17).

Pour le deuxième scénario, les principaux tributaires ont été ajoutés et définis par l'option « Drain ». Cette option de ModFlow permet aux cellules de drainer l'aquifère lorsque la charge est plus élevée que celle dans le drain. La différence entre cette option et l'option

« River » réside d'une part dans le fait que les caractéristiques de la rivière peuvent être assignées à un tronçon, alors que ceux du drain doivent l'être cellule par cellule et d'autre part dans le fait qu'un drain ne pourra jamais alimenter l'aquifère. Les paramètres de conductivité hydraulique du fond de la rivière, de niveau de la surface de l'eau et de niveau du fond de la rivière sont nécessaires pour l'option « River » tandis que seuls le niveau d'eau et la conductivité hydraulique sont requis pour l'option « Drain ».

Le tableau 5.16 présentent les valeurs des paramètres ayant permis d'obtenir le meilleur calage des charges.

Tableau 5.16: Conductivités hydrauliques du roc calées pour le scénario 2.

Couche	Conductivité hydraulique horizontale (m/jour)
1	5
2	2
3	0,8
4	0,1
5	0,01

Les figures suivantes présentent les résultats du meilleur calage pour le scénario 2. La figure 5.34 indique la piézométrie simulée. La comparaison des charges mesurées et des charges simulées à ces points est représentée à la figure 5.35. Les charges simulées ont également été comparées aux charges des données du SIH (figure 5.36).

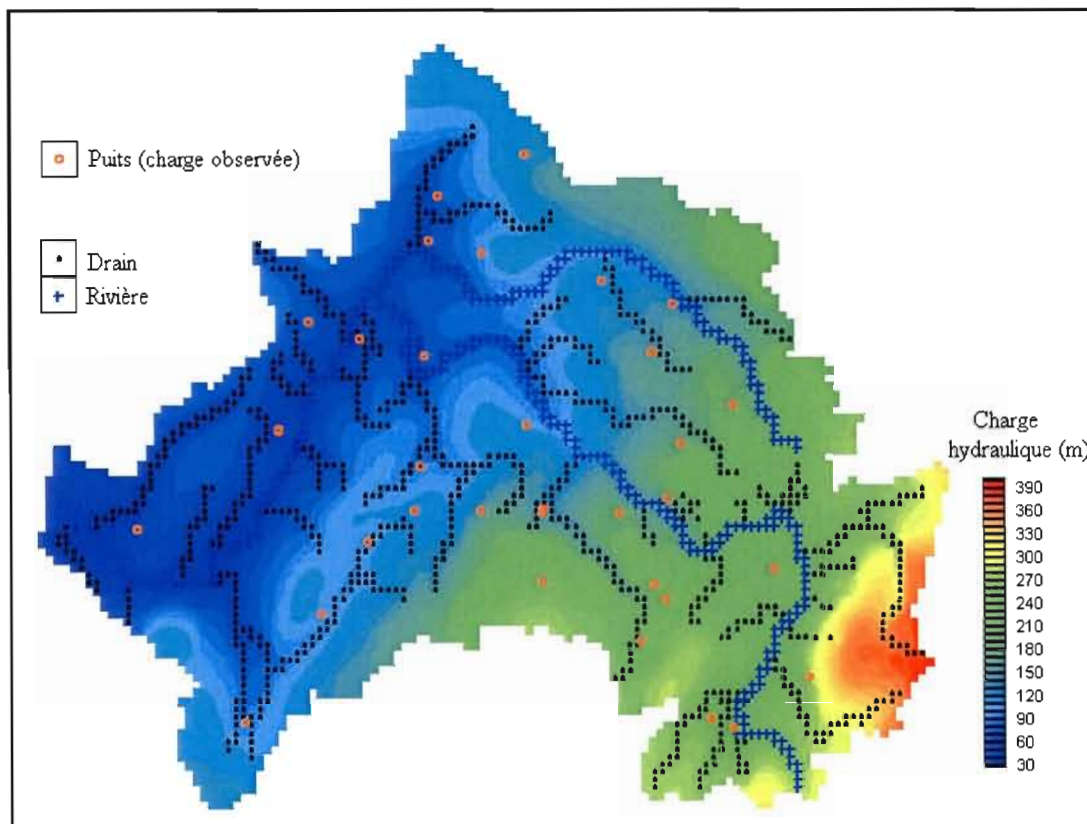


Figure 5.34 : Carte piézométrique simulée – scénario 2.

La répartition d'une recharge annuelle du bassin plus importante dans le secteur amont permet un meilleur calage du modèle à la réalité observée sur le terrain. Les charges maximales retrouvées sur le bassin, dans la zone amont, atteignent 400 m et se concentrent davantage autour de la droite d'égalité (figure 5.36).

Les charges simulées représentent bien les charges observées sur l'ensemble du territoire avec un pente près de 1 et un R^2 plus élevé que le premier scénario.

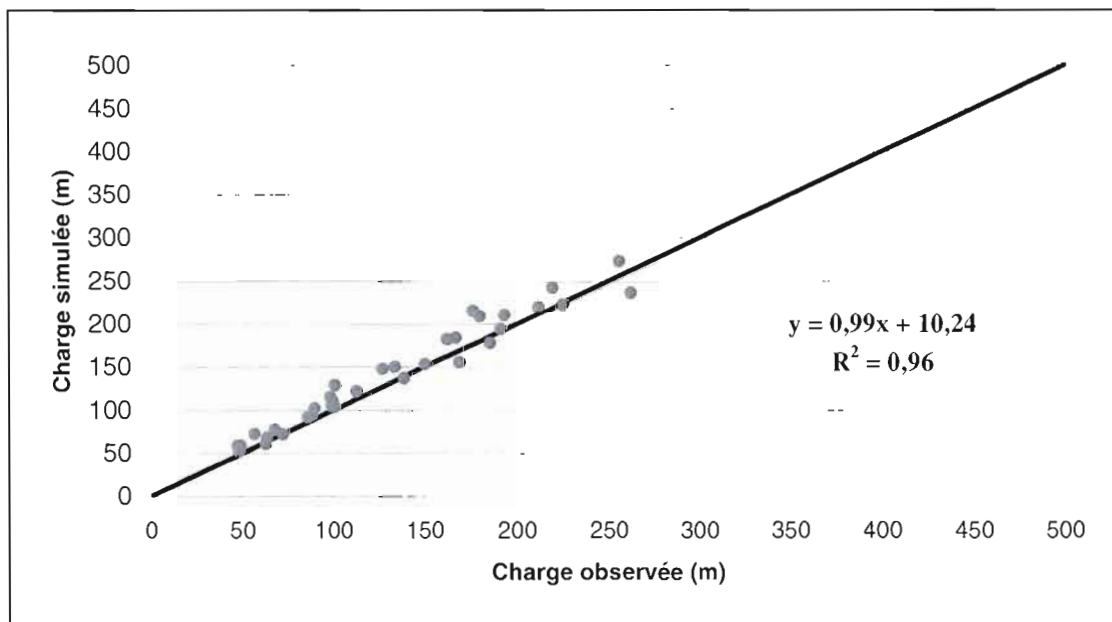


Figure 5.35 : Comparaison des charges observées sur le terrain et des charges simulées avec le scénario 2.

L'ajout des tributaires dans le modèle avec l'option « Drain » a pour effet de rabaisser les charges qui étaient sur-estimées principalement au centre et à l'aval du bassin. Néanmoins, les drains contraignent énormément le modèle en éliminant tout volume d'eau excédentaire. Le bilan hydrique du modèle indique que les drains drainent 662 000 m³ d'eau par jour de l'aquifère alors que la rivière Noire n'en draine que 379 000 m³ pour la même période. Le débit de base de l'aquifère vers les drains est plus important par un facteur de 1,75 fois que celui drainé par la rivière Noire. La contribution de la nappe aux débits des tributaires est donc plus importante que la réalité observée sur la carte piézométrique.

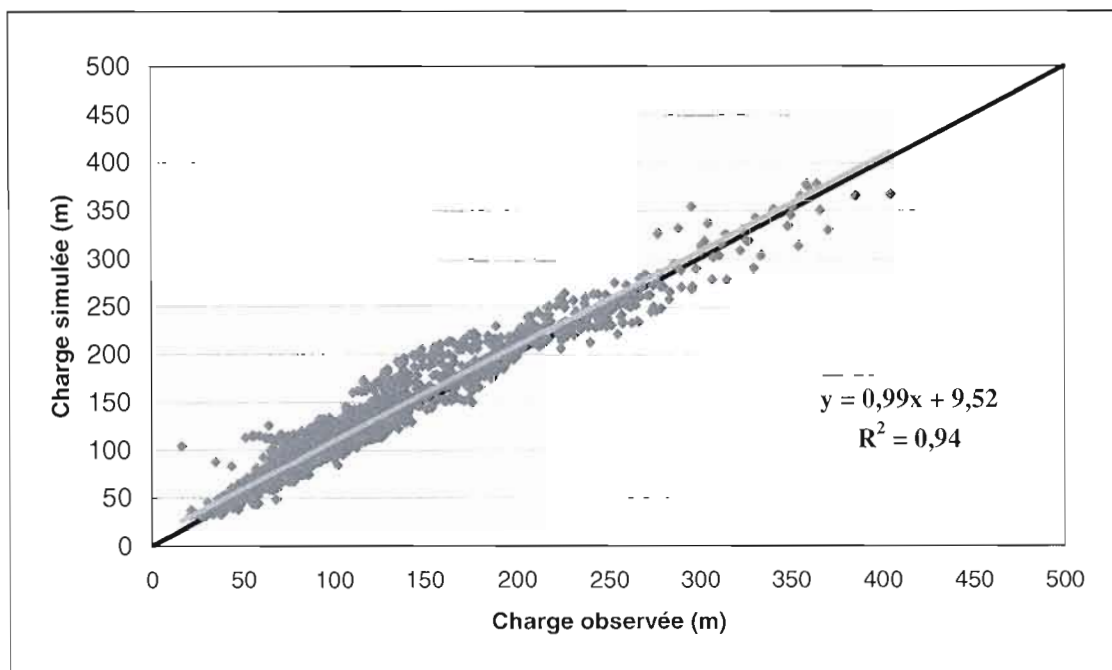


Figure 5.36 : Comparaison des charges observées (données du SIH) et des charges simulées avec le scénario 2.

5.2 Discussion

Le scénario 1 n'est pas satisfaisant car il surestime les charges sur presque tout le domaine d'étude. Le scénario 2 permet de représenter de manière plus adéquate les charges mesurées. Le calage des conductivités hydrauliques dans les couches du modèle a eu pour effet d'améliorer les charges simulées au centre et à l'aval du bassin.

Le scénario 2 montre que la recharge de l'aquifère du bassin de la rivière Noire est plus importante dans le secteur amont, à l'extrémité est du bassin. Une infiltration d'eau plus importante est nécessaire au modèle pour que les charges hydrauliques simulées se rapprochent de la réalité piézométrique observée. Les niveaux les plus élevés de la carte piézométrique régionale du bassin se situent autour de 480 m.

Néanmoins, les drains compris dans le modèle ont contribué grandement à la bonne représentation du modèle régional. Les cours d'eau secondaires jouent donc un rôle plus important que pensé sur l'écoulement souterrain local et régional, bien qu'en chiffres, ce rôle soit sur-estimé. Toutefois, l'option « Drain » devient intéressante pour la modélisation de bassin régionaux de grandes superficie.

L'écoulement régional vers le nord-ouest est bien visible dans les charges simulées. Tous les scénarios présentés montrent l'influence de la rivière Noire et de ses affluents sur la piézométrie du bassin. Tel que remarqué dans les chapitres précédents, la nature des dépôts meubles n'a pas d'influence sur la concordance des relevés piézométrique et topographique puisque le bassin est bien modélisé, même en les omettant. Aussi, les contrastes verticaux de conductivités hydrauliques représentent bien la circulation de l'eau souterraine dans le socle. Ceci tend à montrer que les variations verticales de conductivité hydrauliques du roc définissent mieux l'écoulement que les variations latérales de faciès géologiques. Le contraste de conductivités hydrauliques verticales porte à croire qu'un modèle doté de 3 ou 4 couches seulement aurait donné les mêmes résultats.

Le modèle régional de circulation souterraine accompli sur le bassin de la rivière Noire représente bien les tendances régionales des directions d'écoulement. Les différences entre les charges observées et simulées peuvent être attribuées aux systèmes d'écoulement locaux non-représentés par le modèle.

5.3 Conclusion

Le calage des résultats fut opéré en modifiant les paramètres de conductivités hydrauliques et de recharge dans le modèle afin de rapprocher les charges générées par la simulation des charges correspondant à la réalité observée sur le territoire. Les données piézométriques issues de la base de données du SIH ainsi que les mesures de niveaux relevées sur le terrain à au printemps 2003 ont servi à la vérification des charges obtenues par les simulations. Le modèle issu du scénario 2 représente correctement l'écoulement régional et sur le plan local,

l'influence de la rivière et de ces tributaires est également sensible. Le modèle simule bien les conditions hydrogéologiques du territoire.

CONCLUSION

La détermination des directions d'écoulements sur le bassin de la rivière Noire a été achevée à l'aide de trois démarches individuelles afin, dans un premier temps, d'en étudier la complémentarité et dans un deuxième temps, d'évaluer la pertinence d'appliquer cette méthode sur d'autres bassins régionaux.

En premier lieu, l'étude hydrogéologique du bassin a été réalisée. Cette démarche a permis d'établir que l'écoulement régional orienté vers le nord-ouest était localement influencé par la rivière Noire, et même par certains de ses affluents majeurs. L'échange nappe-rivière semble concentré à l'aval du bassin. L'étude de la piézométrie laisse croire que l'aquifère se poursuit au dehors des limites du bassin hydrologique. L'écoulement régional est principalement régi par la topographie et par une recharge plus importante à l'amont du bassin.

La géochimie de l'eau souterraine a confirmé les résultats obtenus avec l'étude hydrogéologique, soit entre autres que l'eau circule régionalement vers le nord-ouest. Le secteur amont, constitué de roches plissées, faillées et faiblement recouvert de dépôts meubles perméables, représente une zone de recharge importante de l'aquifère. Les indicateurs de pH, conductivité et d'isotopes stables sont faibles et appauvris dans ce secteur indiquant une zone d'infiltration des précipitations, et le temps de séjour de l'eau souterraine augmente vers le nord-ouest. L'aquifère est vulnérable à la contamination par les nitrates et la campagne d'échantillonnage réalisée dans le cadre de cette étude a permis d'évaluer que 25 % des puits de surface et 10 % des puits profonds échantillonnés présentent une concentration supérieure à 3,0 mg N-NO₃/L.

La modélisation hydrogéologique effectuée à l'aide de ModFlow a également montré les liens hydrauliques entre la rivière Noire et l'aquifère. Une recharge plus importante à l'est du bassin et un contraste de conductivités hydrauliques importants entre les couches de roc

ont été nécessaires à l'obtention de charges simulées réalistes. Les scénarios de simulation réalisés montrent que l'écoulement régional de l'eau souterraine est principalement régi par les contrastes de conductivités hydrauliques, plutôt que par la variation latérale de faciès géologiques.

De façon générale, la démarche de l'étude de la piézométrie à l'échelle du bassin a été probante. Seules les hypothèses simplificatrices posées pour évaluer le débit de base de la rivière Noire ne furent pas concluantes au point de vue quantification. Aussi, l'analyse géochimique de l'eau souterraine en ions majeurs n'a pas permis d'établir un sens à la minéralisation induite par la circulation de l'eau dans le roc. Cependant, les résultats obtenus des paramètres physico-chimiques et des isotopes stables ont permis de vérifier l'hypothèse selon laquelle l'étude de la géochimie permettrait de caractériser l'écoulement régional. L'analyse géochimique de l'eau n'a pas été concluante pour les ions majeurs et la minéralisation induite par la circulation de l'eau dans le socle. Toutefois, une densité d'échantillons plus grande n'aurait probablement pas aidé davantage puisque l'aquifère est de type libre, et l'infiltration qui a lieu sur la majorité du territoire ne permet pas d'évaluer cette minéralisation le long des lignes d'écoulement.

La complémentarité des méthodes utilisées dans cette étude est confirmée. La description hydrogéologique complète du bassin couplée à l'analyse géochimique ont permis d'arriver rapidement à des simulations hydrogéologiques représentatives de l'écoulement souterrain du bassin.

L'hypothèse initiale selon laquelle les directions d'écoulement peuvent être identifiées à partir d'info limitées n'est que partiellement confirmée. En effet, davantage de points de mesure de niveaux piézométriques, ou du moins des stations mieux distribuées sur le bassin, auraient permis de quantifier les gradients hydrauliques verticaux. L'accès à davantage de données piézométriques aurait également permis l'application du modèle en régime transitoire, ou encore la conceptualisation de l'aquifère à partir d'un modèle couplé.

Finalement, la démarche utilisée dans le cadre de cette étude peut certainement être employée pour la détermination des directions d'écoulements sur d'autres bassins régionaux, du moment qu'une quantité minimale d'information est répertoriée et accessible.

ANNEXE 1

COUPES PIÉZOMÉTRIQUES

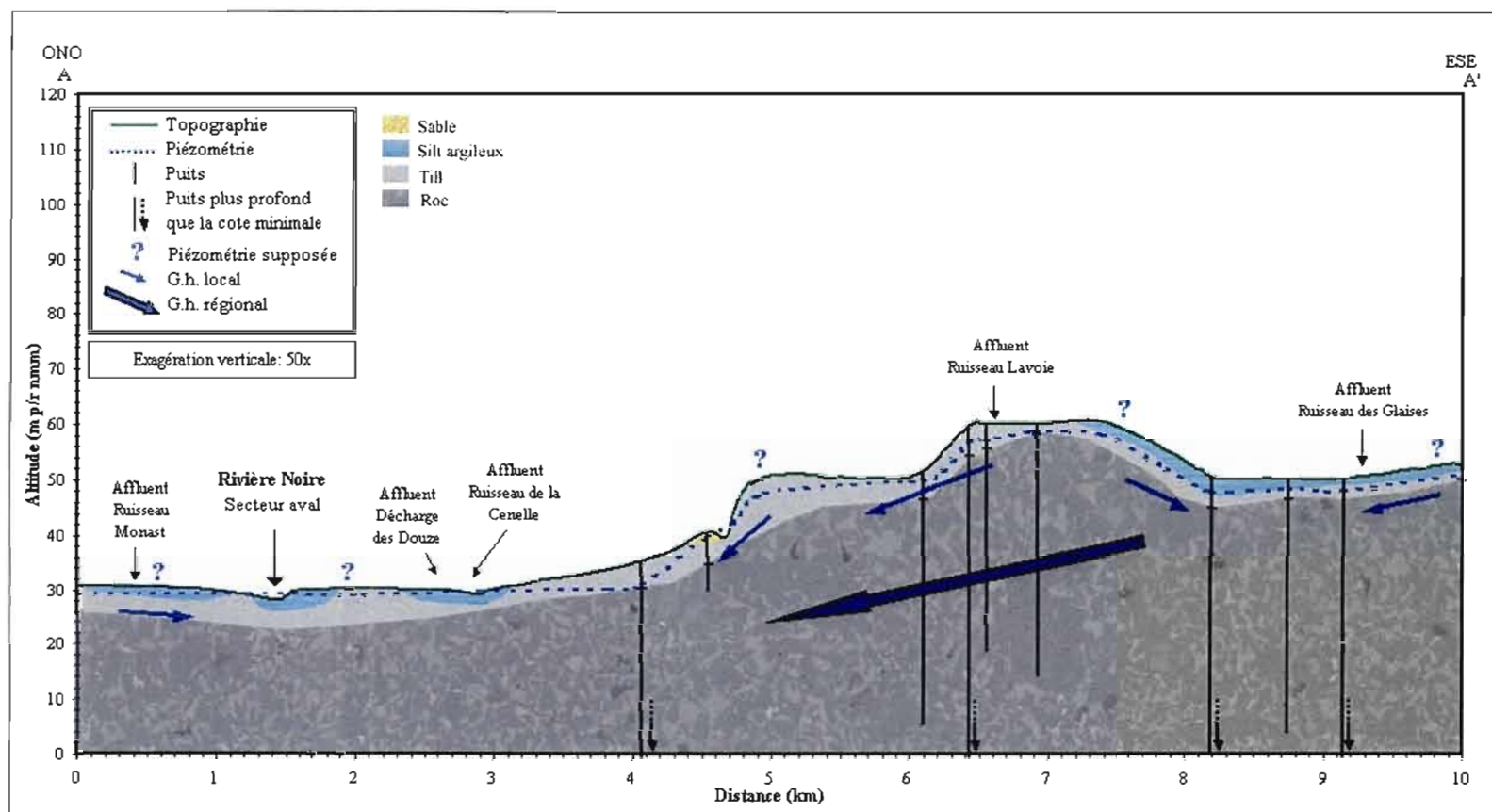


Figure A.1.37 : Agrandissement segment 0-10 km de la coupe A-A'.

En aval du bassin, les systèmes d'écoulement locaux ne sont pas prononcés, ils se rapprochent du gradient hydraulique régional.

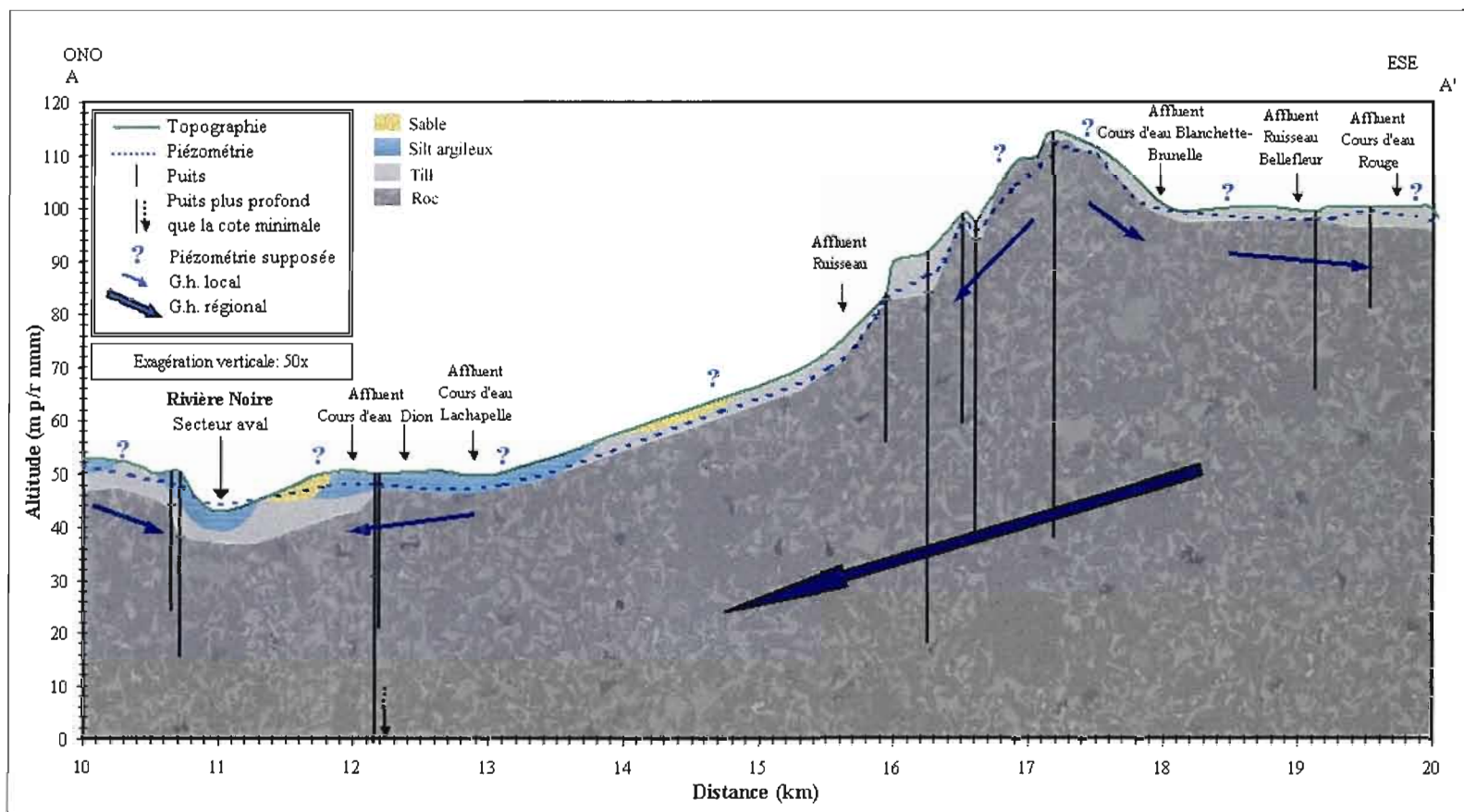


Figure A.1.38 : Agrandissement du segment 10-20 km de la coupe A-A'.

Près du lit de la rivière Noire, le débit de base de l'aquifère vers la rivière provient de l'écoulement régional. Les dépôts meubles n'influencent pas les directions d'écoulement.

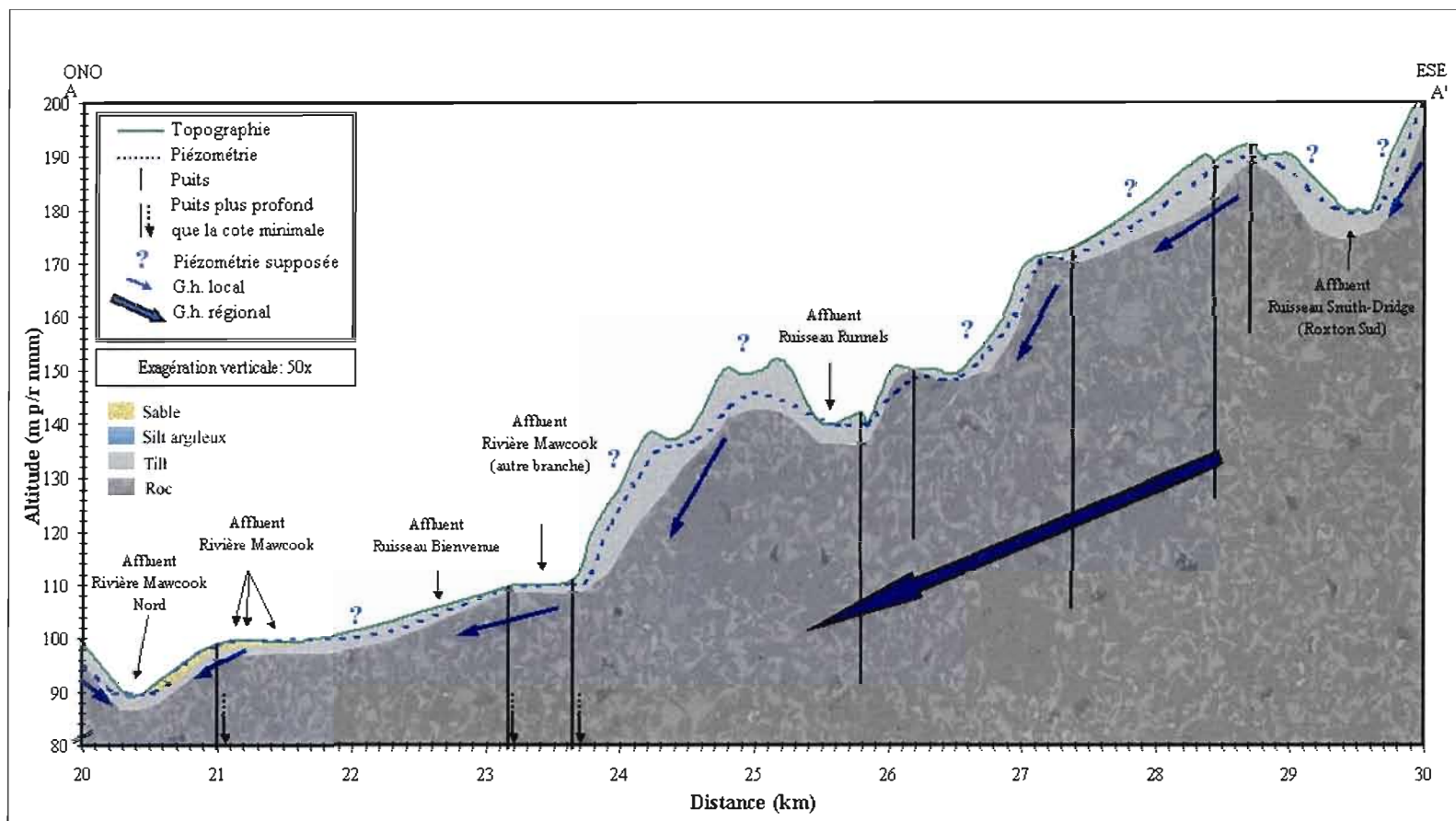


Figure A.1.39 : Agrandissement du segment 20-30 km de la coupe A-A'.

Au centre du bassin, les systèmes d'écoulement locaux deviennent plus fréquents et importants en raison des dénivelés topographiques.

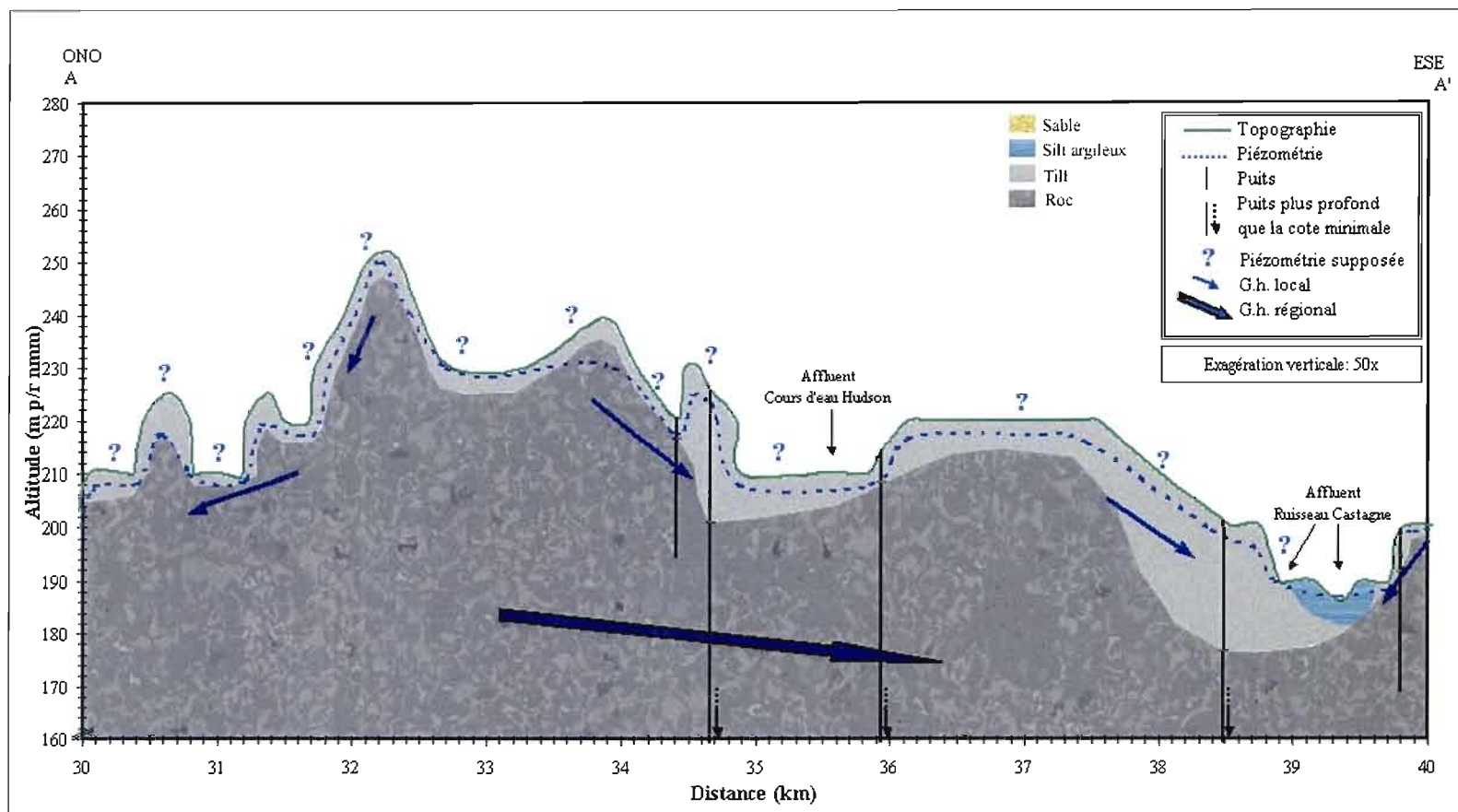


Figure A.1.40 : Agrandissement du segment 30-40 km de la coupe A-A'.

Le gradient hydraulique régional est localement inversé en raison de la topographie et d'un affluent majeur du réseau hydrographique.

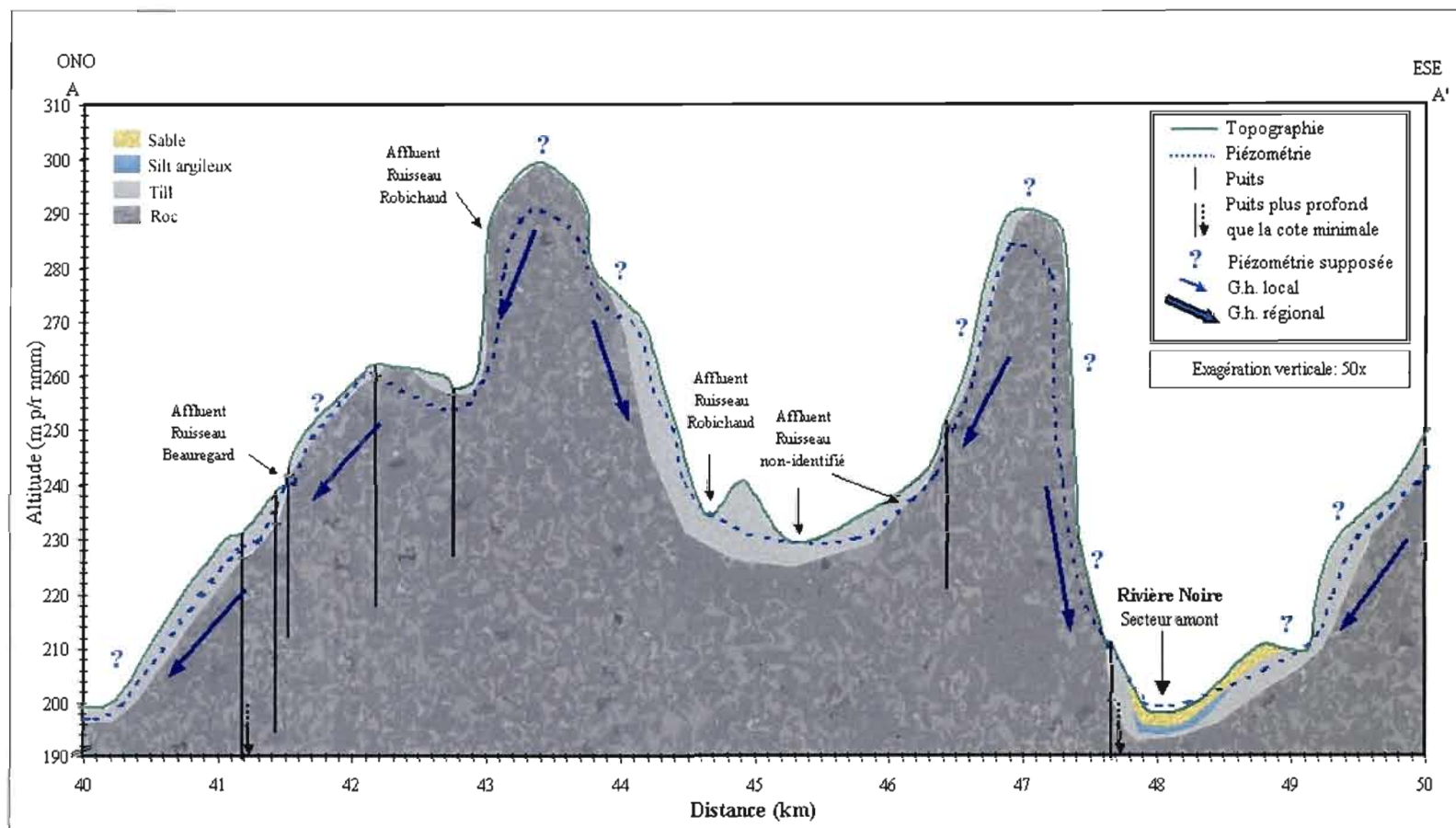


Figure A.1.41 : Agrandissement du segment 40-50 km de la coupe A-A'.

Les systèmes d'écoulement locaux sont dominants en allant vers l'amont du bassin.

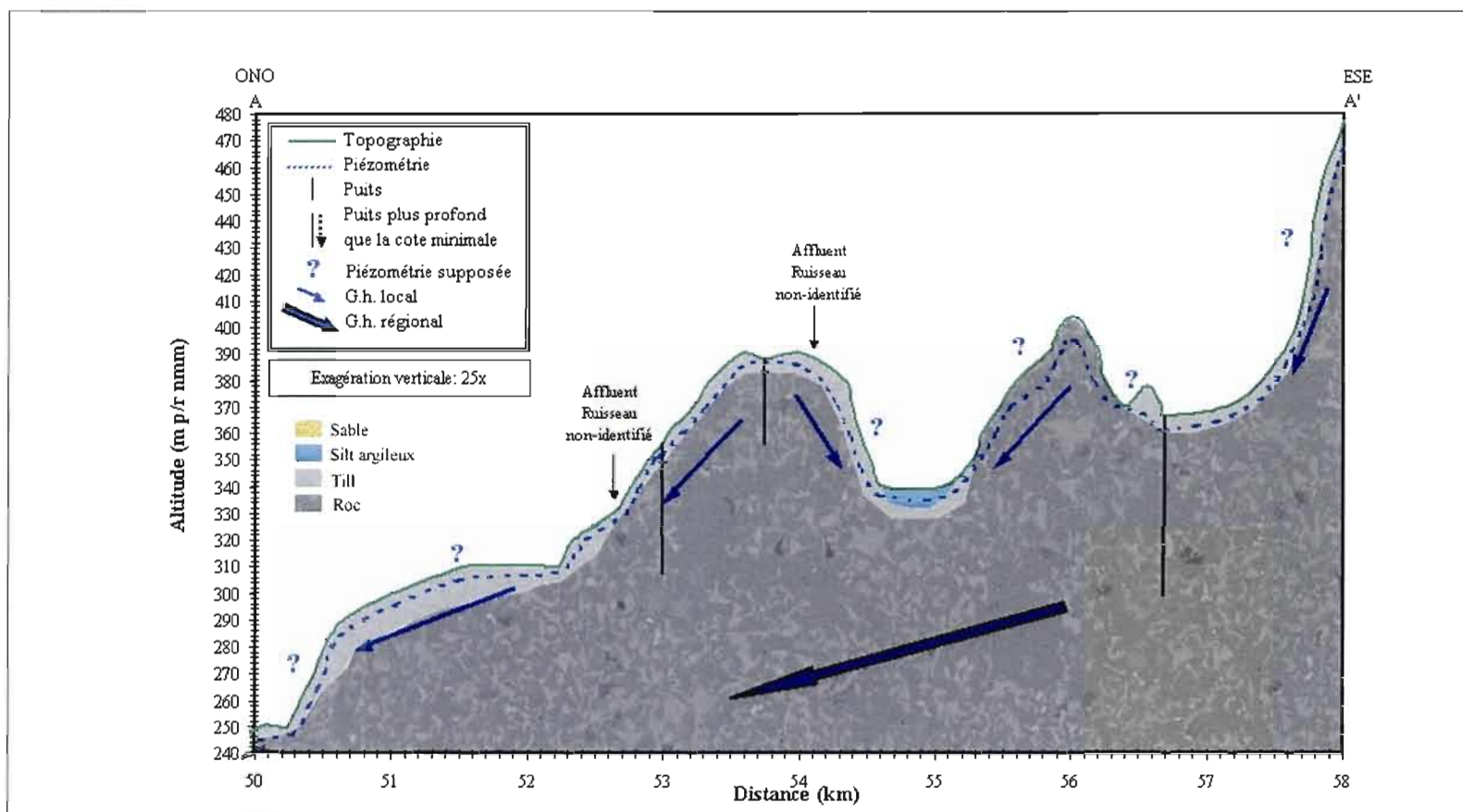


Figure A.1.42 : Agrandissement du segment 50-58 km de la coupe A-A'.

Les gradients hydrauliques des systèmes d'écoulement locaux sont prononcés en amont en raison du dénivelé topographique.

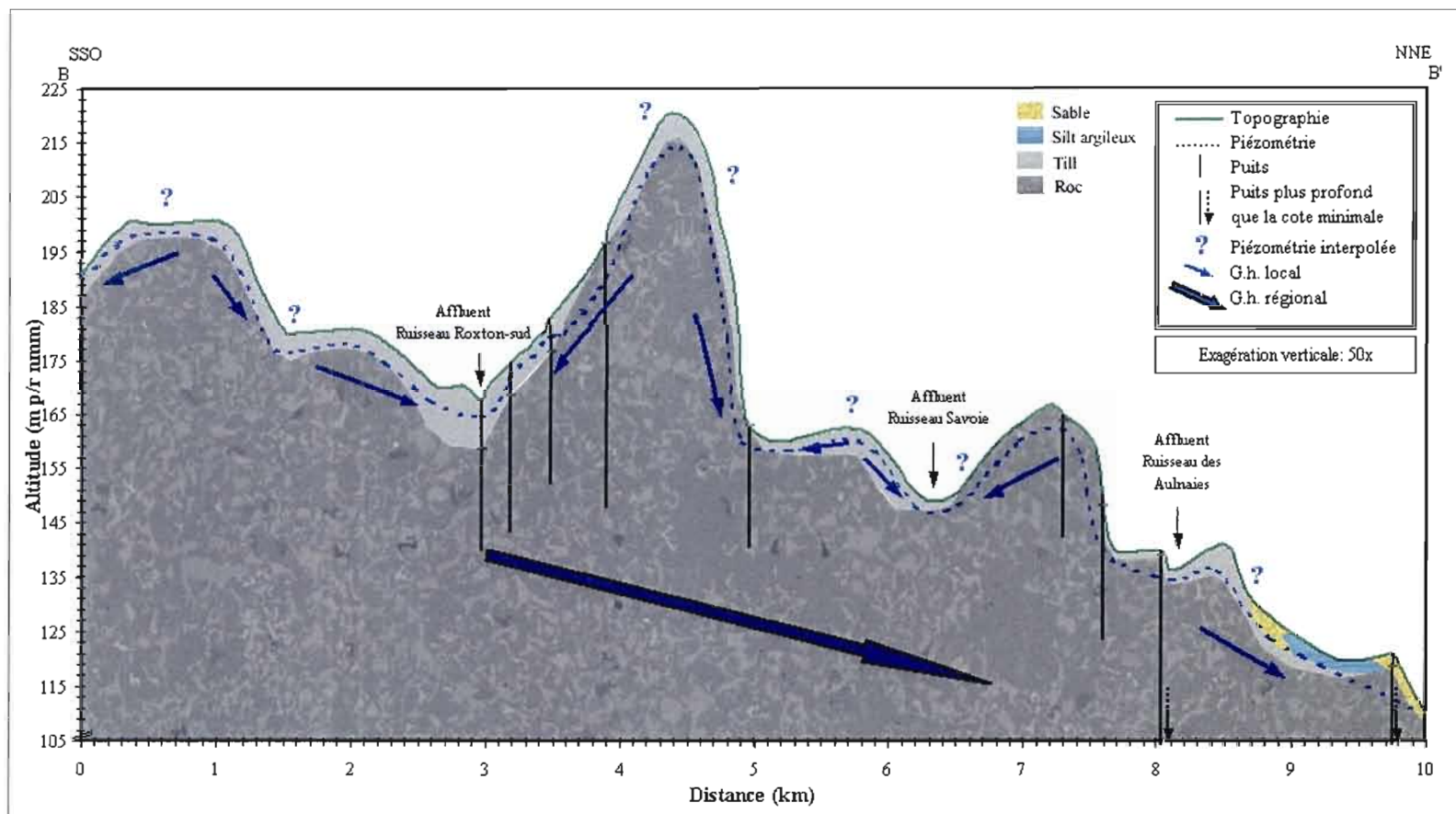


Figure A.1.43 : Agrandissement du segment 0-10 km de la coupe B-B'.

Le gradient hydraulique régional s'oriente vers le NNE, soit la rivière Noire. Les systèmes d'écoulement locaux alimentent les affluents secondaires.

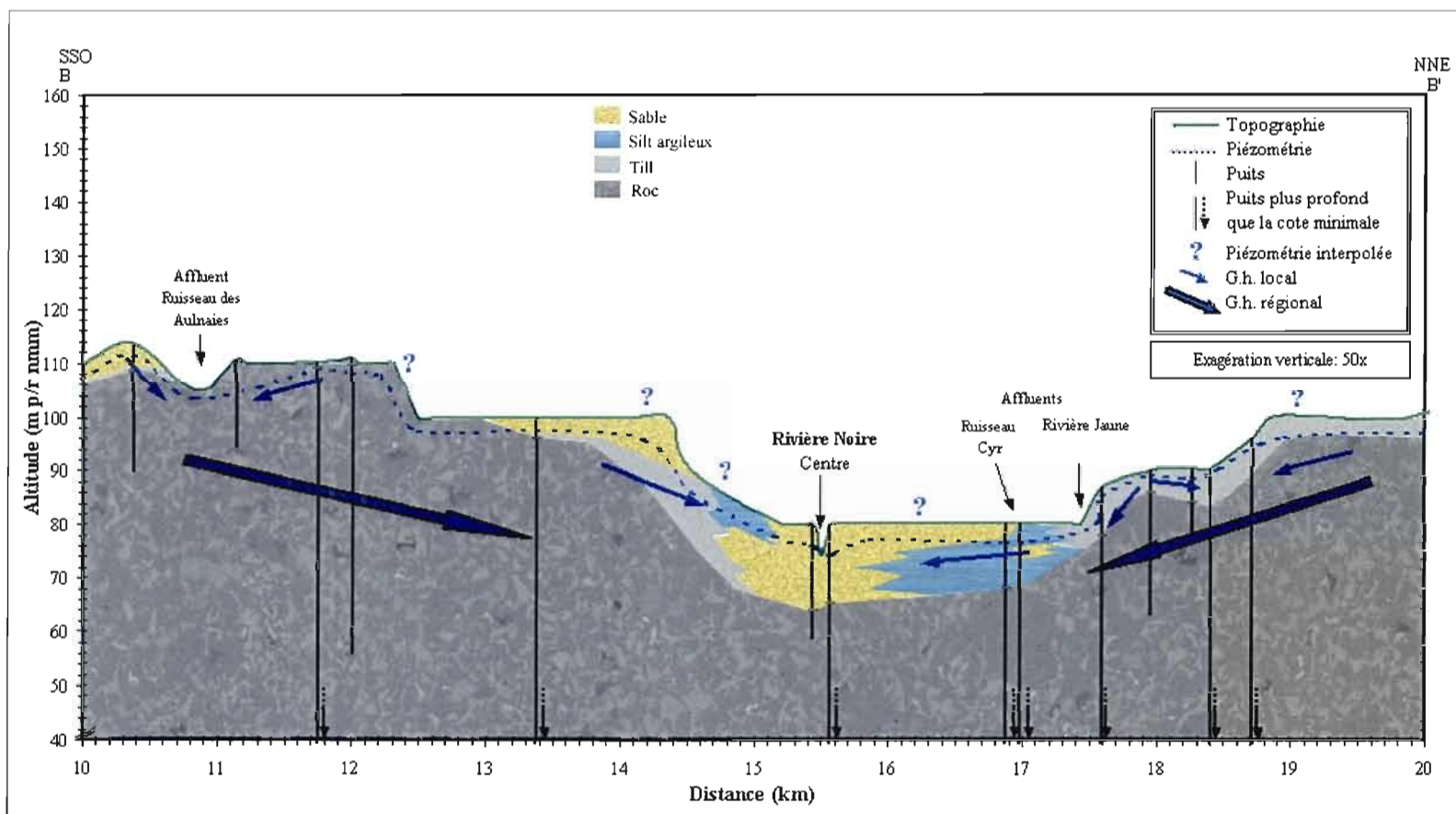


Figure A.1.44 : Agrandissement du segment 10-20 km de la coupe B-B'.

La rivière Noire est alimentée par l'écoulement régional du bassin. La présence des dépôts meubles dans le lit de la rivière n'influence pas les directions d'écoulement.

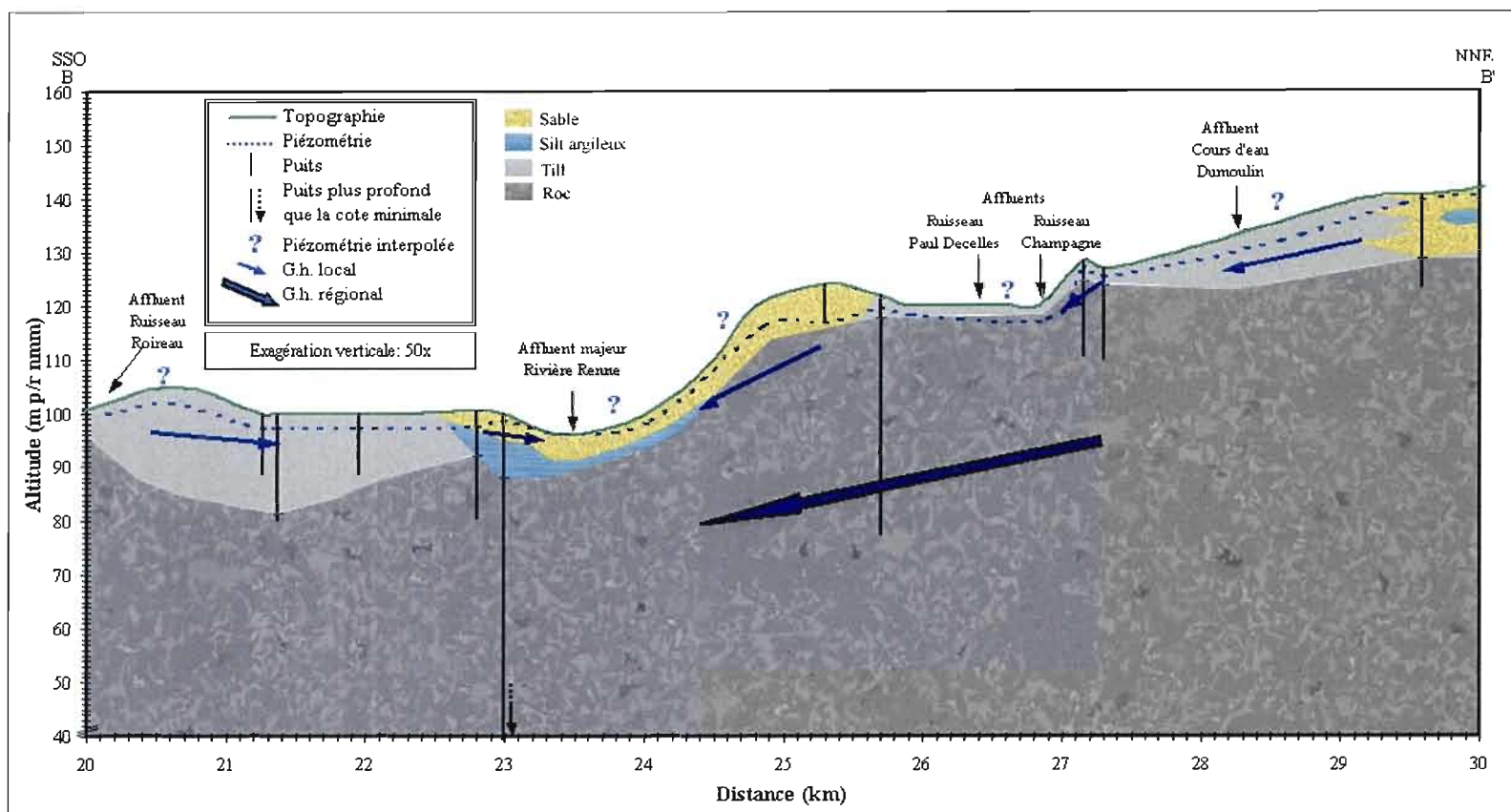


Figure A.1.45 : Agrandissement du segment 20-30 km de la coupe B-B'.

La rivière Renne, bras nord de la rivière Noire, est aussi alimentée par l'écoulement régional.

ANNEXE 2

RÉSULTATS GÉOCHIMIQUES

Tableau A.2.17 : Résultats physico-chimiques des échantillons d'eau.

Station	Type	Profondeur	pH	Conductivité	Température	Potentiel d'oxydo- réduction	O ₂ dissous	Saturation en oxygène
		(m)		(μ S/cm)	(°C)	(mV)	(mg/l)	(%)
RN05/03- D01	eau surface	-	6,92	295	19,4	222	6,92	74,6
RN05/03- ES02	eau surface	-	6,75	142	23,7	190	8,75	97,3
RN05/03- ES02a	eau surface		7,50	139	17,2	119	9,50	103,0
RN05/03- P03	puits	61,0	7,08	1173	8,8	88	0,35	3,2
RN05/03- P04	puits	n/d	6,85	738	10,5	205	1,72	17,5
RN05/03- P05	puits	50,3	7,65	826	20,3	295	3,00	31,2
RN05/03- P06	résurgence(p.surface)	3,4	6,70	465	9,8	230	4,57	40,5
RN05/03- P07	puits	44,2	6,50	154	11,1	700	1,50	13,8
RN05/03- P08	puits	34,8	6,90	305	13,0	11	0,50	4,5
RN05/03- ES09	eau surface	-	7,75	63	12,7	238	8,85	84,0
RN05/03- P10	puits	n/d	7,03	41	12,5	272	8,10	78,0
RN05/03- P11	source	0,0	6,30	327	12,5	437	7,20	70,0
RN05/03- D12	eau surface	-	6,40	90	15,4	300	10,40	105,0
RN05/03- P13	puits	27,4	6,15	247	10,9	250	7,45	68,0
RN05/03- P14	p surface		6,55	349	10,6	260	2,67	24,5
RN05/03- P15	p surface	4,3	6,40	50	9,2	248	9,00	79,0
RN05/03- P16a	puits	96,3	6,60	191	12,5	36	1,06	11,0

Station	Type	Profondeur	pH	Conductivité	Température	Ptoentiel d'oxydo- réduction	O ₂ dissous	Saturation en oxygène
RN05/03- P16b	p surface	3,7	6,52	464	14,3	210	4,30	42,0
RN05/03- P17	p surface	n/d	7,10	202	8,8	248	6,18	55,3
RN05/03- D18	eau surface	-	6,87	127	14,8	272	10,25	100,0
RN05/03- P19	p surface	n/d	6,70	666	12,0	121	0,80	8,0
RN05/03- P20	puits	140,2	6,85	334	10,9	297	5,77	52,9
RN05/03- P21	puits	22,9	7,30	410	11,8	155	0,65	6,2
RN05/03- P22	puits	38,1	7,90	315	9,5	140	0,57	4,7
RN05/03- P23a	p surface	3,7	7,24	764	12,1	240	1,84	17,8
RN05/03- P23b	puits	n/d	7,52	574	10,8	277	3,86	35,3
RN05/03- P24	puits	76,2	7,53	310	16,7	259	6,98	69,0
RN05/03- P25	puits	61,0	6,55	580	9,7	225	0,64	5,9
RN05/03- P26	p surface	3,7	6,90	107	12,8	296	9,20	90,0
RN05/03- D27	eau surface	-	6,70	160	14,8	222	8,83	87,8
RN05/03- P28	puits	97,6	7,04	598	9,5	193	1,60	15,0
RN05/03- P29	puits	n/d	8,10	295	9,8	-58	0,53	4,7
RN05/03- P30a	puits	9,8	8,13	428	7,9	-118	0,30	2,7
RN05/03- P30b	p surface	n/d	8,13	488	13,4	185	7,40	73,0
RN05/03- P31	puits	19,8	7,70	630	11,4	181	0,66	5,6
RN05/03- P32	puits	22,9	7,99	221	8,7	160	1,18	10,3
RN05/03- P33	puits	54,9	8,00	380	10,1	187	1,28	14,0

Station	Type	Profondeur	pH	Conductivité	Température	Ptoentiel d'oxydo- réduction	O ₂ dissous	Saturation en oxygène
RN05/03- P34	puits	90,5	8,02	323	10,6	213	3,70	33,0
RN05/03- P35	puits	10,4	7,80	380	9,1	233	8,51	74,5
RN05/03- P36	puits	61,0	8,15	433	11,0	201	0,32	3,0
RN05/03- P37	puits	20,7	8,50	333	11,5	50	1,90	17,4
RN05/03- P38	puits	n/d	8,13	470	8,8	10	2,83	25,0
RN05/03- P39	puits	> 61,0	8,27	304	11,6	142	2,76	26,1
RN05/03- P40	puits	91,5	9,11	487	8,4	-171	2,20	19,4
RN05/03- P41a	puits	33,5	7,60	555	10,0	180	4,52	41,2
RN05/03- P41b	p surface	n/d	8,50	403	10,4	179	5,17	48,0
RN05/03- P42	source gravité (p. surface)	0,0	8,29	252	8,5	162	6,00	54,0
RN05/03- P43	puits	n/d	8,10	412	9,5	102	0,80	7,0
RN05/03- ES44	eau surface	-	8,50	134	15,0	153	10,00	100,0
RN05/03- P45	puits	61,0	8,28	357	9,9	34	0,60	5,5
RN05/03- D46	eau surface	-	8,13	118	17,0	190	9,00	95,0
RN05/03- P47	puits	27,4	-	341	13,0	220	6,03	57,3
RN05/03- P48	p pointe		8,70	937	10,5	-8	3,36	3,3
RN05/03- P49	puits	45,7	7,97	648	10,4	205	0,67	6,0
RN05/03- P50	puits	152,4	8,28	673	9,8	126	0,79	7,2
RN05/03- P51	puits	54,9	8,10	779	11,9	147	2,70	24,8

Station	Type	Profondeur	pH	Conductivité	Température	Ptoentiel d'oxydo- réduction	O ₂ dissous	Saturation en oxygène
RN05/03- P52	puits	80,8	7,65	877	10,0	120	0,72	6,5
RN05/03- P53	puits	n/d	7,47	754	11,7	202	1,27	12,1
RN05/03- P54	puits	76,2	7,66	420	13,2	-21	0,27	2,6
RN05/03- P55a	puits	97,6	7,60	1158	15,9	184	1,55	16,4
RN05/03- P55b	puits	54,9	7,88	822	11,0	179	0,58	5,4
RN05/03- P56	p surface	1,4	7,9/ 6,16	126	13,0	251	4,99	50,5
RN05/03- P57	puits	n/d	6,82	703	10,6	217	1,85	17,5
RN05/03- P58	puits	n/d	6,70	1448	12,8	38	0,60	6,0
RN05/03- P59	p surface	4,6	6,80	525	9,5	145	1,70	15,0
RN05/03- P60	puits	45,7	6,80	233	11,2	204	6,88	64,5
RN05/03- P61	puits	n/d	7,63	788	10,1	73	1,23	11,5
RN05/03- D62	eau surface	-	7,50	610	15,3	165	11,70	120,0
RN05/03- P63	puits	n/d	8,20	729	9,7	-83	0,98	8,7
RN05/03- P64a	puits	27,4	8,00	421	12,4	19	0,66	6,2
RN05/03- P64b	p surface	n/d	8,70	419	13,9	93	3,15	30,0
RN05/03- ES65	eau surface	-	7,85	229	17,2	162	8,90	93,0
RN05/03- D66	eau surface	-	7,96	770	14,0	182	12,01	117,0
RN05/03- P67	puits	7,0	7,78	477	11,7	34	1,08	10,0
RN05/03- P68	puits	54,9	7,20	1588	10,5	99	1,38	12,7

Station	Type	Profondeur	pH	Conductivité	Température	Ptoentiel d'oxydo- réduction	O ₂ dissous	Saturation en oxygène
RN05/03- P69	puits	10,7	7,24	1533	13,8	173	1,27	12,4
RN05/03- P70	puits	n/d	7,77	747	9,9	65	0,47	4,8
RN05/03- P71	puits	27,4	7,72	859	11,7	-33	0,58	5,3
RN05/03- P72	puits	91,5	7,80	630	15,5	-13	1,16	13,0
RN05/03- P73	puits	n/d	7,68	1191	10,9	161	6,71	61,0
RN05/03- P74	puits	21,3	7,14	1159	11,5	20	1,86	17,5
RN05/03- D75	eau surface	-	8,30	788	16,5	190	13,60	142,0
RN05/03- P76	puits	7,6	7,80	705	10,0	12 / -5	1,11	10,0
RN05/03- P77	puits	57,9	7,80	775	11,2	50	3,20	30,0

Tableau A.2.18 : Résultats des concentrations des échantillons en cations majeurs

Station	Type	Profondeur	Al ³⁺	Ca ²⁺	Fe ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Mn ⁺	Na ⁺	Si ²⁺
		(m)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
RN05/03- D01	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- ES02	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- ES02a	eau surface		0,096	17,8	0,276	1,12	3,06	0,0360	6,0	0,78
RN05/03- P03	puits	61,0	0,008	105	0,166	4,35	37,7	0,408	81,0	7,10
RN05/03- P04	puits	n/d	0,005	76,0	0,006	2,06	24,9	0,848	44,6	6,57
RN05/03- P05	puits	50,3	<0.004	4,34	0,032	0,34	1,59	0,013	193	3,78
RN05/03- P06	résurgence(p.surface)	3,4	0,015	51,1	0,019	3,89	6,85	0,004	26,5	3,68
RN05/03- P07	puits	44,2	0,004	22,8	0,008	1,23	4,28	0,053	2,5	3,41
RN05/03- P08	puits	34,8	<0.004	39,4	0,169	1,68	11,2	0,072	8,5	7,07
RN05/03- ES09	eau surface	-	0,027	8,73	0,165	0,84	1,57	0,024	1,4	1,75
RN05/03- P10	puits	n/d	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P11	source	0,0	<0.004	49,2	0,002	1,50	7,55	0,001	4,3	6,24
RN05/03- D12	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P13	puits	27,4	0,006	33,0	0,043	0,98	3,93	0,024	9,0	3,30
RN05/03- P14	p surface		0,012	58,9	0,024	1,39	2,41	0,038	10,3	2,95
RN05/03- P15	p surface	4,3	<0.004	5,90	0,001	0,52	1,12	0,0007	1,1	1,45
RN05/03- P16a	puits	96,3	-	-	-	-	-	-	-	-

Station	Type	Profondeur	Al ³⁺	Ca ²⁺	Fe ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Mn ⁺	Na ⁺	Si ²⁺
RN05/03- P16b	p surface	3,7	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P17	p surface	n/d	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- D18	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P19	p surface	n/d	0,019	63,0	5,69	12,4	7,40	6,30	37,8	4,72
RN05/03- P20	puits	140,2	0,005	45,6	0,002	2,90	7,27	0,0011	7,8	4,06
RN05/03- P21	puits	22,9	<0.004	43,2	0,090	0,48	20,2	0,004	12,7	6,98
RN05/03- P22	puits	38,1	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P23a	p surface	3,7	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P23b	puits	n/d	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P24	puits	76,2	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P25	puits	61,0	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P26	p surface	3,7	<0.004	10,8	0,009	0,97	1,88	0,005	4,6	3,66
RN05/03- D27	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P28	puits	97,6	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P29	puits	n/d	<0.004	33,4	0,812	0,61	8,82	0,302	13,5	5,43
RN05/03- P30a	puits	9,8	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P30b	p surface	n/d	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P31	puits	19,8	0,008	89,4	0,010	13,3	9,93	0,871	13,8	6,44
RN05/03- P32	puits	22,9	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P33	puits	54,9	<0.004	33,1	0,006	0,74	5,65	0,139	35,8	5,67
RN05/03- P34	puits	90,5	<0.004	29,7	0,001	0,46	4,31	0,0022	30,0	4,68

Station	Type	Profondeur	Al ³⁺	Ca ²⁺	Fe ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Mn ⁺	Na ⁺	Si ²⁺
RN05/03- P35	puits	10,4	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P36	puits	61,0	0,005	31,8	0,005	2,06	11,8	0,108	40,2	3,53
RN05/03- P37	puits	20,7	<0.004	5,57	0,010	3,14	2,18	0,0112	63,2	4,66
RN05/03- P38	puits	n/d	<0.004	32,3	0,154	5,59	11,2	0,165	43,6	7,53
RN05/03- P39	puits	> 61,0	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P40	puits	91,5	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P41a	puits	33,5	0,005	95,9	0,012	1,10	12,9	0,0071	5,4	4,48
RN05/03- P41b	p surface	n/d	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P42	source gravité (p. surface)	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P43	puits	n/d	<0.004	30,0	0,040	0,34	19,8	0,0212	30,0	5,72
RN05/03- ES44	eau surface	-	0,047	17,4	0,280	0,96	2,79	0,0173	5,2	0,59
RN05/03- P45	puits	61,0	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- D46	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P47	puits	27,4	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P48	p pointe		-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P49	puits	45,7	0,005	91,3	0,092	2,62	17,4	0,113	19,2	6,34
RN05/03- P50	puits	152,4	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P51	puits	54,9	<0.004	0,07	0,034	0,43	0,006	0,0006	175	5,57
RN05/03- P52	puits	80,8	0,004	58,4	0,081	2,67	32,6	0,181	80,6	6,81
RN05/03- P53	puits	n/d	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P54	puits	76,2	<0.004	32,3	0,141	0,84	11,8	0,0175	40,4	6,08

Station	Type	Profondeur	Al ³⁺	Ca ²⁺	Fe ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Mn ⁺	Na ⁺	Si ²⁺
RN05/03- P55a	puits	97,6	0,005	87,9	0,006	1,35	25,4	0,0273	103	6,75
RN05/03- P55b	puits	54,9	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P56	p surface	1,4	0,085	16,1	0,058	0,41	1,11	0,0070	3,6	2,51
RN05/03- P57	puits	n/d	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P58	puits	n/d	0,007	180	1,67	2,39	22,9	0,468	79,7	8,81
RN05/03- P59	p surface	4,6	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P60	puits	45,7	0,008	31,6	0,006	0,97	5,63	0,0005	7,6	5,09
RN05/03- P61	puits	n/d	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- D62	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P63	puits	n/d	<0.004	4,83	0,008	0,52	2,78	0,0010	155	3,70
RN05/03- P64a	puits	27,4	<0.004	15,0	0,038	2,25	8,54	0,0201	59,9	4,75
RN05/03- P64b	p surface	n/d	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- ES65	eau surface	-	0,090	29,9	0,269	2,13	4,82	0,0359	9,5	1,71
RN05/03- D66	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P67	puits	7,0	0,007	76,9	0,359	0,98	10,7	0,127	5,6	4,95
RN05/03- P68	puits	54,9	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P69	puits	10,7	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P70	puits	n/d	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P71	puits	27,4	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P72	puits	91,5	0,004	50,2	0,116	1,10	9,9	0,622	72,3	5,78
RN05/03- P73	puits	n/d	0,007	74,5	0,017	2,52	17,9	0,0731	143	5,91

Station	Type	Profondeur	Al ³⁺	Ca ²⁺	Fe ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Mn ⁺	Na ⁺	Si ²⁺
RN05/03- P74	puits	21,3	0,006	159	2,29	2,48	22,3	0,254	58,5	6,55
RN05/03- D75	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P76	puits	7,6	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P77	puits	57,9	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau A.2.19 : Résultats des concentrations des échantillons en anions majeurs

Station	Type	Profondeur	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻
		(m)	(mg/L)	(mg/L)	(mg-NO2/L)	(mg/L)	(mg-NO3/L)	(mg-PO4/L)	(mg-SO4/L)
RN05/03- D01	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- ES02	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- ES02a	eau surface		< 0.2	18,26	< 0.1	< 0.05	1,75	< 0.2	8,9
RN05/03- P03	puits	61,0	< 0.2	141,09	< 0.1	< 0.05	3,45	< 0.2	50,88
RN05/03- P04	puits	n/d	< 0.2	52,51	< 0.1	< 0.05	16,07	< 0.2	59,57
RN05/03- P05	puits	50,3	0,7	53,08	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	50,5
RN05/03- P06	résurgence(p.surface)	3,4	< 0.2	60,76	< 0.1	< 0.05	14,36	< 0.2	15,6
RN05/03- P07	puits	44,2	< 0.2	1,47	< 0.1	< 0.05	1,33	< 0.2	15,28
RN05/03- P08	puits	34,8	< 0.2	3,33	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	19,05
RN05/03- ES09	eau surface	-	< 0.2	3,25	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	4,72
RN05/03- P10	puits	n/d	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P11	source	0,0	< 0.2	6,45	< 0.1	< 0.05	45,52	< 0.2	12,83
RN05/03- D12	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P13	puits	27,4	< 0.2	24,46	< 0.1	< 0.05	5,96	< 0.2	9,59
RN05/03- P14	p surface		< 0.2	17	< 0.1	< 0.05	2,82	< 0.2	6,33
RN05/03- P15	p surface	4,3	< 0.2	1,91	< 0.1	< 0.05	4,88	< 0.2	5,65
RN05/03- P16a	puits	96,3	-	-	-	-	-	-	-

Station	Type	Profondeur	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻
RN05/03- P16b	p surface	3,7	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P17	p surface	n/d	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- D18	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P19	p surface	n/d	< 0.2	93,68	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	14,63
RN05/03- P20	puits	140,2	< 0.2	21,2	< 0.1	< 0.05	33,03	< 0.2	12,89
RN05/03- P21	puits	22,9	< 0.2	15,02	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	26,71
RN05/03- P22	puits	38,1	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P23a	p surface	3,7	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P23b	puits	n/d	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P24	puits	76,2	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P25	puits	61,0	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P26	p surface	3,7	< 0.2	17,06	< 0.1	< 0.05	1,98	< 0.2	5,95
RN05/03- D27	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P28	puits	97,6	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P29	puits	n/d	0,3	5,7	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	10,85
RN05/03- P30a	puits	9,8	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P30b	p surface	n/d	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P31	puits	19,8	< 0.2	33,76	< 0.1	< 0.05	17,51	< 0.2	23,96
RN05/03- P32	puits	22,9	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P33	puits	54,9	< 0.2	21,17	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	56,87
RN05/03- P34	puits	90,5	< 0.2	20,37	< 0.1	< 0.05	7,57	< 0.2	27,11

Station	Type	Profondeur	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻
RN05/03- P35	puits	10,4	-	-	-	-	-	-	-
RN05#03- P36	puits	61,0	< 0.2	7,72	< 0.1	< 0.05	0,8	< 0.2	9,71
RN05#03- P37	puits	20,7	< 0.2	9,76	< 0.1	< 0.05	0,8	< 0.2	72,66
RN05#03- P38	puits	n/d	0,64	3,83	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	10,79
RN05/03- P39	puits	> 61,0	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P40	puits	91,5	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P41a	puits	33,5	0,3	15,4	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	64,93
RN05/03- P41b	p surface	n/d	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P42	source gravité (p. surface)	0,0	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P43	puits	n/d	0,2	6,96	< 0.1	< 0.05	4,55	< 0.2	38,85
RN05/03- ES44	eau surface	-	0,3	8,71	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	28,96
RN05/03- P45	puits	61,0	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- D46	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P47	puits	27,4	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P48	p pointe		-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P49	puits	45,7	< 0.2	7,7	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	7,4
RN05/03- P50	puits	152,4	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P51	puits	54,9	< 0.2	36,35	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	67,37
RN05/03- P52	puits	80,8	< 0.2	46,72	< 0.1	< 0.05	8,05	< 0.2	59
RN05/03- P53	puits	n/d	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P54	puits	76,2	0,2	37,25	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	113,31

Station	Type	Profondeur	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻
RN05/03- P55a	puits	97,6	0,3	15,34	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	27,38
RN05/03- P55b	puits	54,9	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P56	p surface	1,4	0,4	206,91	< 0.1	< 0.05	1,75	< 0.2	40,87
RN05/03- P57	puits	n/d	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P58	puits	n/d	< 0.2	235,66	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	43,82
RN05/03- P59	p surface	4,6	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P60	puits	45,7	< 0.2	10	< 0.1	< 0.05	4,26	< 0.2	14,85
RN05/03- P61	puits	n/d	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- D62	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P63	puits	n/d	0,9	56,16	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	7,3
RN05/03- P64a	puits	27,4	0,3	26,6	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	28,74
RN05/03- P64b	p surface	n/d	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- ES65	eau surface	-	< 0.2	13,35	< 0.1	< 0.05	6,07	< 0.2	18,66
RN05/03- D66	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P67	puits	7,0	< 0.2	16,09	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	91,25
RN05/03- P68	puits	54,9	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P69	puits	10,7	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P70	puits	n/d	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P71	puits	27,4	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P72	puits	91,5	< 0.2	25,36	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	55,3
RN05/03- P73	puits	n/d	0,4	177,29	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	62,19

Station	Type	Profondeur	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ⁻	SO ₄ ²⁻
RN05/03- P74	puits	21,3	< 0.2	113,65	< 0.1	< 0.05	< 0.5	< 0.2	146,53
RN05/03- D75	eau surface	-	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P76	puits	7,6	-	-	-	-	-	-	-
RN05/03- P77	puits	57,9	-	-	-	-	-	-	-

Tableau A.2.20 : Résultats des échantillons en carbone inorganique dissous

Station	Type	Carbone				
		Profondeur	inorganique	[HCO ₃ ⁻]	[H ₂ CO ₃]	[CO ₃ ²⁻]
		mètre	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
RN05/03- D01	eau surface	-	-	-	-	-
RN05/03- ES02	eau surface	-	-	-	-	-
RN05/03- ES02a	eau surface		11	10,26	0,73	0,02
RN05/03- P03	puits	61,0	90	75,84	14,12	0,05
RN05/03- P04	puits	n/d	64	48,61	15,37	0,02
RN05/03- P05	puits	50,3	75	71,28	3,57	0,16
RN05/03- P06	résurgence(p.surface)	3,4	31,1	21,49	9,60	0,01
RN05/03- P07	puits	44,2	16,2	9,48	6,71	0,00
RN05/03- P08	puits	34,8	35,0	27,30	7,69	0,01
RN05/03- ES09	eau surface	-	5,73	5,50	0,22	0,02
RN05/03- P10	puits	n/d	-	-	-	-
RN05/03- P11	source	0,0	28,7	13,52	15,17	0,00
RN05/03- D12	eau surface	-	-	-	-	-
RN05/03- P13	puits	27,4	21,1	8,16	12,94	0,00
RN05/03- P14	p surface		41,4	25,38	16,01	0,01
RN05/03- P15	p surface	4,3	5,32	2,81	2,51	0,00
RN05/03- P16a	puits	96,3	-	-	-	-

Station	Type	Profondeur	Carbone			
			inorganique	[HCO ₃ ⁻]	[H ₂ CO ₃]	[CO ₃ ²⁻]
			dissous			
RN05/03- P16b	p surface	3,7	-	-	-	-
RN05/03- P17	p surface	n/d	-	-	-	-
RN05/03- D18	eau surface	-	-	-	-	-
RN05/03- P19	p surface	n/d	46,6	32,21	14,39	0,01
RN05/03- P20	puits	140,2	29,4	22,33	7,06	0,01
RN05/03- P21	puits	22,9	42,6	38,27	4,29	0,04
RN05/03- P22	puits	38,1	-	-	-	-
RN05/03- P23a	p surface	3,7	-	-	-	-
RN05/03- P23b	puits	n/d	-	-	-	-
RN05/03- P24	puits	76,2	-	-	-	-
RN05/03- P25	puits	61,0	-	-	-	-
RN05/03- P26	p surface	3,7	7	5,46	1,54	0,00
RN05/03- D27	eau surface	-	-	-	-	-
RN05/03- P28	puits	97,6	-	-	-	-
RN05/03- P29	puits	n/d	36	35,17	0,63	0,21
RN05/03- P30a	puits	9,8	-	-	-	-
RN05/03- P30b	p surface	n/d	-	-	-	-
RN05/03- P31	puits	19,8	65	62,08	2,77	0,15
RN05/03- P32	puits	22,9	-	-	-	-
RN05/03- P33	puits	54,9	27,5	26,78	0,60	0,13

Station	Type	Profondeur	Carbone			
			inorganique	[HCO ₃ ⁻]	[H ₂ CO ₃]	[CO ₃ ²⁻]
			dissous			
RN05/03- P34	puits	90,5	25,2	24,55	0,52	0,12
RN05/03- P35	puits	10,4	-	-	-	-
RN05#03- P36	puits	61,0	35,5	34,72	0,55	0,23
RN05#03- P37	puits	20,7	42	41,10	0,29	0,61
RN05#03- P38	puits	n/d	40,2	39,30	0,65	0,25
RN05/03- P39	puits	> 61,0	-	-	-	-
RN05/03- P40	puits	91,5	-	-	-	-
RN05/03- P41a	puits	33,5	61	57,65	3,24	0,11
RN05/03- P41b	p surface	n/d	-	-	-	-
RN05/03- P42	source gravité (p. surface)	0,0	-	-	-	-
RN05/03- P43	puits	n/d	47,7	46,60	0,83	0,28
RN05/03- ES44	eau surface	-	12,4	12,13	0,09	0,18
RN05/03- P45	puits	61,0	-	-	-	-
RN05/03- D46	eau surface	-	-	-	-	-
RN05/03- P47	puits	27,4	-	-	-	-
RN05/03- P48	p pointe		-	-	-	-
RN05/03- P49	puits	45,7	61	59,32	1,42	0,27
RN05/03- P50	puits	152,4	-	-	-	-
RN05/03- P51	puits	54,9	68	66,43	1,18	0,40
RN05/03- P52	puits	80,8	80	76,03	3,81	0,17

Station	Type	Profondeur	Carbone			
			inorganique	[HCO ₃ ⁻]	[H ₂ CO ₃]	[CO ₃ ²⁻]
			dissous			
RN05/03- P53	puits	n/d	-	-	-	-
RN05/03- P54	puits	76,2	43,1	41,00	2,01	0,09
RN05/03- P55a	puits	97,6	62	58,60	3,30	0,12
RN05/03- P55b	puits	54,9	-	-	-	-
RN05/03- P56	p surface	1,4	13,7	13,28	0,37	0,05
RN05/03- P57	puits	n/d	-	-	-	-
RN05/03- P58	puits	n/d	98	67,73	30,25	0,02
RN05/03- P59	p surface	4,6	-	-	-	-
RN05/03- P60	puits	45,7	32,9	24,28	8,61	0,01
RN05/03- P61	puits	n/d	-	-	-	-
RN05/03- D62	eau surface	-	-	-	-	-
RN05/03- P63	puits	n/d	75	73,42	1,04	0,55
RN05/03- P64a	puits	27,4	35,4	34,47	0,77	0,16
RN05/03- P64b	p surface	n/d	-	-	-	-
RN05/03- ES65	eau surface	-	16,7	16,14	0,51	0,06
RN05/03- D66	eau surface	-	-	-	-	-
RN05/03- P67	puits	7,0	31,9	30,67	1,14	0,09
RN05/03- P68	puits	54,9	-	-	-	-
RN05/03- P69	puits	10,7	-	-	-	-
RN05/03- P70	puits	n/d	-	-	-	-

Station	Type	Profondeur	Carbone			
			inorganique	[HCO ₃ ⁻]	[H ₂ CO ₃]	[CO ₃ ²⁻]
			dissous			
RN05/03- P71	puits	27,4	-	-	-	-
RN05/03- P72	puits	91,5	62	59,71	2,12	0,18
RN05/03- P73	puits	n/d	68,1	64,92	3,04	0,15
RN05/03- P74	puits	21,3	85	73,10	11,86	0,05
RN05/03- D75	eau surface	-	-	-	-	-
RN05/03- P76	puits	7,6	-	-	-	-
RN05/03- P77	puits	57,9	-	-	-	-

ANNEXE 3

PHOTOS DU BASSIN DE LA RIVIÈRE NOIRE

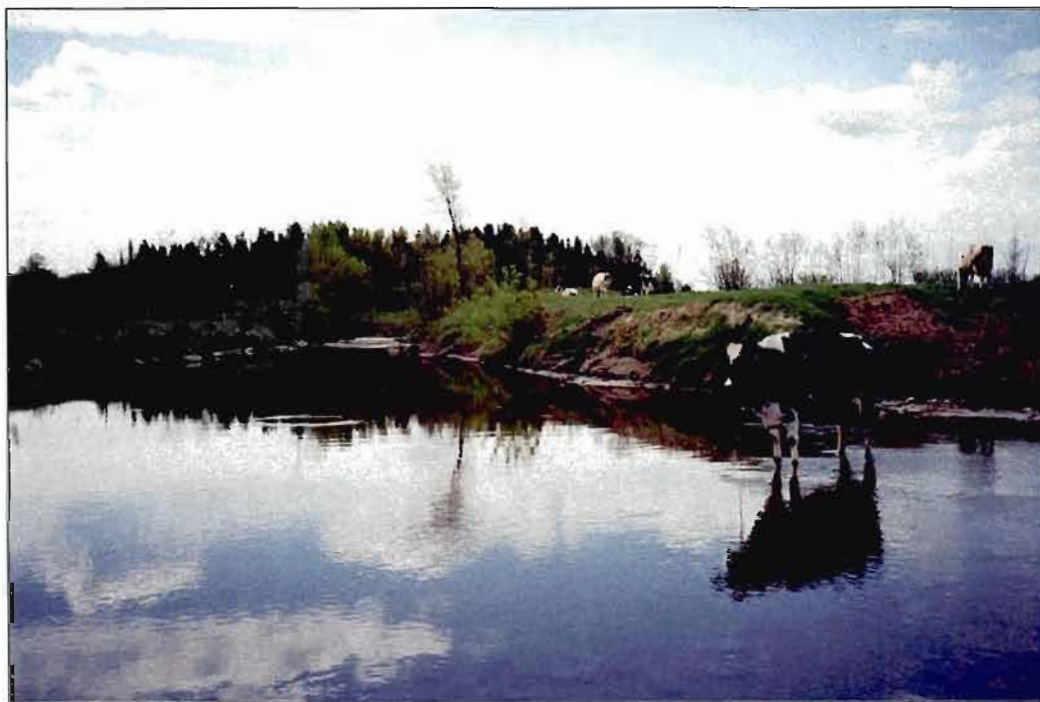


PHOTO 1 : Rivière Noire en amont, traversant des terres agricoles et des pâturages.



PHOTO 2 : La rivière Noire (centre est du bassin) avec le Mont Yamaska (direction sud).



PHOTO 3 : Vue générale du centre du bassin de la rivière Noire.



PHOTO 4 : Rivière Noire.

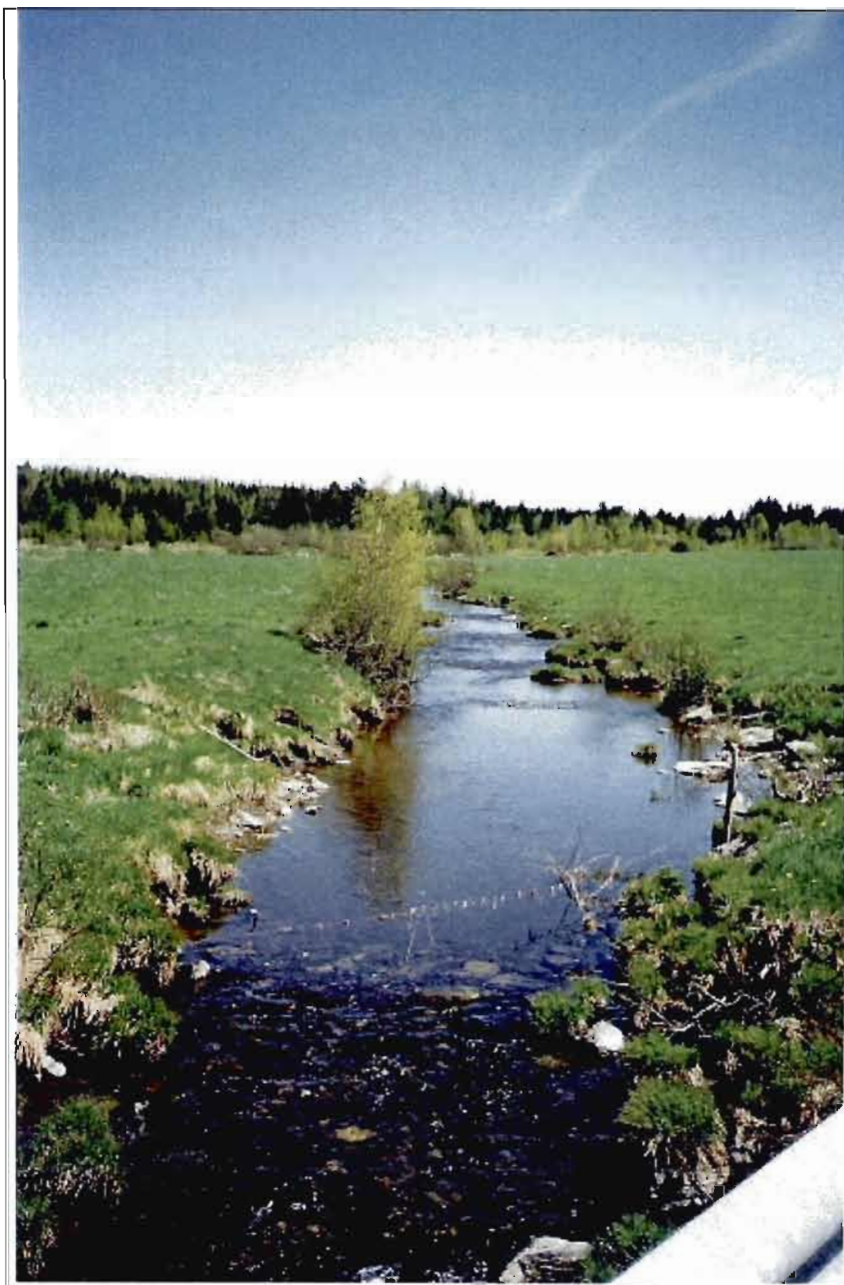


PHOTO 5 : La Rivière Noire en amont du bassin, traversant des pâturages.



PHOTO 6 : Champs cultivé sur le bassin de la rivière Noire.



PHOTO 7 : Ferme en bordure de la rivière Noire.



PHOTO 8 : Puits de surface dans un champs cultivé du bassin de la rivière Noire.



PHOTO 9 : La rivière Noire bordé de boisé (centre du bassin).

BIBLIOGRAPHIE

AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada). 2003. La santé de l'eau : Vers une agriculture durable au Canada. (Page web), Disponible à res2.agr.gc.ca/publications/hw/04c_f.htm,

Abd El Samie, S.G. et M.A. Sadek. 2001. Groundwater recharge and flow in the lower cretaceous Nubian sandstone aquifer in the Sinai Peninsula, using isotopic techniques and hydrochemistry. *Hydrogeology Journal*, Vol. 9, p.378-389.

André, L., M. Franceschi, P. Pouchan et O. Atteia. 2005. Using geochemical data and modelling to enhance the understanding of groundwater flow in a regional deep aquifer, Aquitaine Basin, south-west of France. *Journal of Hydrology*, Vol. 305, p.40-62.

Benoit, N., Pasquier, P., Marcotte, D., Nastev, M., Conditional stochastic inverse modelling of the Châteauguay river aquifers. *ModelCare 2005*, The Hague, Netherlands. 6 p.

Blanchette, D., Lefebvre, R., Nastev, M., Lamontagne, C., Croteau, A., Lavigne, MA., Roy, N., Cloutier, V., Hydrochemical assessment of groundwater in the Châteauguay River watershed, Québec. 6th Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, Saskatoon 2005, 8 p.

Bolduc, S. 2004. Vulnérabilité de l'eau souterraine à la contamination par les nitrates : géologie, hydrogeology et simulation sur le bassin versant de la rivière Noire (Montérégie, Québec), Mémoire de maîtrise en sciences de la terre, Montréal, UQAM.

Bolduc, S., M. Larocque et G. Prichonnet. 2003. Groundwater nitrate contamination on the Noire River watershed (Montérégie, Québec). Conférence présentée à la 4ième conférence AIH-Canada, 28 sept.-1 oct. 2003, Winnipeg (Canada).

Bolduc, S., M. Larocque et G. Prichonnet. 2006. Vulnérabilité de l'eau souterraine à la contamination par les nitrates sur le bassin versant de la rivière Noire (Montérégie, Québec). *Revue des Sciences de l'Eau*, sous presse.

Chapman, T.G. 1991. Comment on « Evaluation of automated techniques for base flow and recession analysis » by R.J. Nathan and T.A. McMahon. *Water Resources Research*, Vol 27, no.7, pages 1783-1784.

Clark, I., et Fritz, P. 1997. *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis publishers.

Cloutier, V., Bourque, E. Lefebvre, R., Savard, M. Nastev, M. Martel, R. et R. Therrien. 2001. Regional Groundwater Hydrogeochemistry of fractured Rock Aquifers in South-Western Québec, 2001 Odysée de la Terre, p. 1068-1076.

COGEBY, 2004. www.cogebv.qc.ca, Accédé en 2004 et 2005.

Delisle, F., Gariépy, S., Bédard, Y. 1998. Bassin versant de la rivière L'Assomption : l'activité agricole et ses effets sur la qualité de l'eau, Ministère de l'environnement et de la faune. Direction des politiques des secteurs agricole et naturel. 110 p.

Diop, S. et P. Rekacewicz. 2003. Éditions Autrement. Atlas mondial de l'eau , une pénurie annoncée. Le mémorial de Caen.

Djineng Njomo, G.T. 2002. Utiliser les méthodes géophysiques dans l'étude de la contamination des eaux souterraines par les nitrates sur le bassin de la rivière Yamaska, Rapport de stage de maîtrise en sciences de l'environnement, Montréal, Québec, UQAM.

DNEMT, 1996. Note technique no 8, www.industrie.gouv.fr/energie/matieres/pdf/nt08.pdf - Accédé en 2005.

Doiron, A. 1981. Les dépôts quaternaires de la région de Granby-Waterloo, Québec. Mémoire de maîtrise en sciences de la terre, Montréal, Québec, UQAM.

El-said S., Zenhom, M. Taniguchi et Y. Sakura. 2004. Use of temperature profiles and stable isotopes to trace flow lines: Nagaoka area, Japan. *Groundwater*, Vol. 42, no. 1, p 83-91.

Freeze, R. A., Witherspoon, P.A. 1966. Theoretical analysis of regional groundwater flow. 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. *Water Resources Research*, Vol. 2, no. 4., p.641-656.

Freeze, R. A., Witherspoon, P.A. 1967. Theoretical analysis of regional groundwater flow. 2. Effect of water-table configuration and sub-surface permeability variation. *Water Resources Research*, Vol. 3, no. 2., p.623-634.

Fryar, Alan E., William F. Mullican III et Stephen A. Macko. 2001. Groundwater recharge and chemical evolution in the southern High Plains of Texas, USA. *Hydrogeology Journal*, 9: 522-542.

Gauthier, V. 2003. Contribution de l'eau souterraine aux débits de la rivière Noire (Montérégie, Québec), Rapport d'activité de synthèse, Montréal, Québec, UQAM

Gibson, J.J., T.W.D. Edwards, S.J. Birks, N.A. St Amour, W.M. Buhay, P. McEachen, B.B. Wolfe et D.L. Peters. 2005. Progress in isotope tracer hydrology in Canada. *Hydrological Processes*, Vol. 19, p. 303-327.

Ingri, J., A. Widerlund et M. Land. 2005. Geochemistry of major elements in a Pristine boreal river system: hydrological compartments and flow paths. *Aquatic Geochemistry*, Vol. 11, p.57-58.

Joerin, C., K.J. Beven, A. Musy et D. Talamba. 2005. Study of hydrological processes by the contamination of environmental tracing and hill slope measurements: application on the Haute-Mentue catchment. *Hydrological Processes*, in press.

Jørgensen, N. O. et B. K. Banoeng-Yakubo. 2001. Environmental isotopes (^{18}O , ^2H and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) as a tool in groundwater investigations in the Keta basin, Ghana. *Hydrogeology Journal*, Vol. 9, pages 190-201.

Koh, D.-C., H.-W. Chang, K.-S. Lee, K.-S. Ko, Y. Kim et W.-B. Park. 2005. Hydrogeochemistry and environmental isotopes of ground water in Jeju volcanic island, Korea: implications for nitrate contamination. *Hydrological Processes*, Vol. 19, p. 2225-2245.

Lavigne, MA., Nastev, M., Lefebvre, R., Blanchette, D., Croteau, A., Benoît, N., Lamontagne, C., Hydraulic properties of sedimentary rock aquifers in the Châteauguay River watershed, Quebec, Canada. 6th Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, Saskatoon 2005, 8 p.

McDonald, M. et Harbaugh, A. 1988. A modular 3D finite-difference groundwater flow model : USGS TWRI.

MENV (Ministère de l'Environnement du Québec), 2004. Étude de la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé. Ministère de l'Environnement du Québec, Québec, Ca

Michaud, Y; Fortier, R; Parent, M; Pilon, J; 1997 . L'utilisation du géoradar et des méthodes électriques pour la cartographie des formations aquifères du piémont laurentien, Québec; dans, *Current Research 1997-E / Recherches en cours 1997-E*; Geological Survey of Canada. Commission géologique du Canada, Recherches en cours , 1997-E, 1997; pages 73-82

Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la Géoinformation, Compilation de la géologie du Quaternaire. Cartes DV84-10 31H07, 31H08, 31H09, 31H10. 1984, 1 :50 000.

Ministère du Développement Durable, des Parcs et de l'Environnement, 2005a www.mddep.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm, accédé en 2002.

Ministère du Développement Durable, des Parcs et de l'Environnement, 2005b, Règlement sur la qualité de l'eau potable. www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/brochure/index.htm. Accédé en 2005.

Nastev, M., Lamontagne, C., Tremblay, T., Lavoie, D., Hardy, F., Lamothe, L., Croteau, A., Blanchette, D., Lavigne, M-A., Roy, N., Paradis, D., Benoît, N., Lefebvre, R., Marcotte, D., Gaudin, R., Rouleau, A., Hydrogeological overview of the transboundary aquifers in the Châteauguay River Basin, Canada-United States. 5th Joint IAH-CNC and CGS Groundwater Specialty Conference, Quebec 2004, 7 p. CD version

Paré, D. 1978. Étude hydrogéologique, bassin de la Yamaska, Ministère des Richesses Naturelles, Direction générale des eaux.

Pehlivan, Rustem et Osman Yilmaz. 2005. Water quality and hydrogeochemical characteristics of the River Buyukmelen, Duzce, Turkey. Hydrological Processes, in press.

Pint, Christine D. , Randal J. Hunt et Mary P. Anderson. 2003. Flowpath delineation and ground water age, Allequash basin, Wisconsin. Groundwater, Vol. 41, no. 7, p 895-902.

Prichonnet, G. 1984. Dépôts quaternaires de la région de Granby, Québec. Commission géologique du Canada, Étude 83-30

Ressources naturelles Canada, www.gwp.nrcan.gc.ca, accédé en 2005.

Rivard C., Y. Michaud, L. Shawna, A. Bolduc, S. Paradis, D. Paradis, S. Castonguay, C. Deblonde, T. Hamblin, J. Drage, C. Paniconi, T. Webster et I. Spooner. 2005. Characterization of the Annapolis Valley aquifers, Nova Scotia - a work in progress. 6ième conférence conjointe AIH-CNC et CGS Saskatoon.

Rodgers, P., C. Soulsby et S. Waldron. 2005. Stable isotope tracers as diagnostic tools in upscaling flow path understanding and residence time estimates in a mountainous mesoscale catchment. 2005. *Hydrological Processes*, Vol. 19, p. 2291-2307.

Savard *et al* 2000 ; Regional hydrogeological mapping project of the St. Lawrence Lowlands of southwestern Quebec: hydrogeological characterization work 1999-2000;. Commission géologique du Canada, Recherches en cours , no. 2001-D9, 2001; 27 pages

Schwartz, F.W. et Domenico, P.A. 1973. *Physical and chemical hydrogeology*, New York : Wiley, c1998

Soulsby, C., M. Chen, R.C. Ferrier, R.C. Helliwell, A. Jenkins et R. Harriman. 1998. Hydrogeochemistry of shallow groundwater in an upland Scottish catchment. *Hydrological Processes*, Vol. 12, p. 1111-1127.

Subagyono, K., T. Tanaka, Y. Hamada et M. Tsujimura. 2005. Defining hydrochemical evolution of streamflow through flowpath dynamics in Kawakami headwater catchment, central Japan. *Hydrological Processes*, Vol. 19, p. 1939-1965.

Toth, J. 1962. A theory of groundwater motion in small drainage basins in central Alberta, Canada. *Journal of geophysical research*, volume 67, no. 11, pages 4375-4387.

Toth, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of geophysical research*, volume 68, no. 16, pages 4795-4812.

Toth, J. 2005. The Canadian school of hydrogeology: history and legacy. *Ground Water*, Vol. 43, No. 4, pages 640-644.

Walker, John F., Randal J. Hunt, Thomas T. Bullen, David B. Krabenhof et Carol Kendall. 2003. Variability of isotope of major ion chemistry in the Allequash basin, Wisconsin. *Groundwater*, Vol. 41, no. 7, p 883-894.

Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., Alley, W.M., *Ground Water and Surface Water A Single Resource*. U.S. Geological Survey Circular 1139, Colorado 1998, 87 p., pdf version.

Zoellmann, K., W. Kinzelbach et C. Fulda. 2001. Environmental tracer transport (^3H and SF_6) in the saturated and unsaturated zones and its use in nitrate pollution management. *Journal of Hydrology*, Vol. 240, p.187-205.

Zuber, A., S. Wiczak, K. Róžański, I. Śliwka, M. Opoka, P. Mochalski, T. Kuc, J. Karlikowska, J. Kania, M. Jackowicz-Korczyński et M. Duliński. 2005. Groundwater dating with ^3H and SF_6 in relation to mixing patterns, transport modelling and hydrochemistry. *Hydrological Processes*, Vol. 19, p. 2247-2275.

Rivard C., Y. Michaud, L. Shawna, A. Bolduc, S. Paradis, D. Paradis, S. Castonguay, C. Deblonde, T. Hamblin, J. Drage, C. Paniconi, T. Webster et I. Spooner. 2005. Characterization of the Annapolis Valley aquifers, Nova Scotia - a work in progress. 6ième conférence conjointe AIH-CNC et CGS Saskatoon.